

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

SYSTÉM PRO ŘÍZENÍ KAPKOVÉ ZÁVLAHY

CONTROL SYSTEM FOR DRIP IRRIGATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Zíka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Bradáč, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Radim Zíka

ID: 203381

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Systém pro řízení kapkové závlahy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhnete elektronický systém pro řízení systému kapkové závlahy vybavený CPU.

1. Proveďte literární a internetovou rešerši.
2. Navrhnete koncepci řídicího systému.
3. Navrhnete mikrokontrolerový systém, který umožní řízení několika větví kapkové závlahy v sadu na základě časového rozvrhu. Systém musí umožnit časové řízení uzavíracích kulových ventilů na základě zadaných parametrů. Systém vybavte displejem, výkonovými členy a tlačítky. Zaměřte se na vysokou energetickou úspornost.
4. Navrhnete schéma zapojení a zapojení DPS. Navrhnete potřebné programové vybavení.
5. Výsledný systém zhodnotte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Pavel Herout: Učebnice jazyka C, KOPP, 2004, IV. přepracované vydání, ISBN 80-7232-220-6

Dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: doc. Ing. Zdeněk Bradáč, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem elektronického systému pro řízení systému kapkové závlahy. Cílem práce je navrhnout a realizovat mikrokontrolerový systém, který umožní řízení několika větví kapkové závlahy v sadu na základě časového rozvrhu. Při návrhu byl brán ohled na požadavek na vysokou energetickou úspornost celého systému. Teoretická část se zaměřuje na literární rešerši v oblasti řídicích systémů kapkové závlahy, popis kapkové závlahy a popis návrhu energeticky úsporných zařízení. Praktická část je zaměřena na návrh mikrokontrolerového systému, vytvoření schématu zařízení, desky plošného spoje řídicího systému, oživení navrženého systému a vytvoření programového vybavení.

Klíčová slova

Kapková závlaha, návrh závlahového systému, řídicí systém, vysoká energetická úspornost, e-ink displej, bistabilní relé, mikrokontrolér, ESP32, LilyGO TTGO e-ink T5, KiCad, SOLIDWORKS, Visual Studio Code, PlatformIO

Abstract

The bachelor thesis deals with designing drip irrigation control system. Aim of this thesis is realisation of microcontroller system which enables scheduled control of multiple branches of drip irrigation in an orchard. The design is focused on keeping the power consumption of the circuitry as low as possible. Theoretical part of this thesis focuses on research on drip irrigation and on low power circuit design theory. Practical part of thesis covers microcontroller system design, schematic design, printed circuit board design, revival of designed PCB and designing its control software.

Keywords

drip irrigation, irrigation system, control system, low power, e-ink, bistabile relay, microcontroller, ESP32m, LilyGO TTGO e-ink T5, KiCad, SOLIDWORKS, Visual Studio Code, PlatformIO

Bibliografická citace

ZÍKA, Radim. *Systém pro řízení kapkové závlahy*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127013>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Zdeněk Bradáč.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových, a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 07.06.2020

.....
(podpis autora)

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Zdeňku Bradáčovi, Ph.D. za všestrannou pomoc, množství cenných a inspirativních rad, podnětů, doporučení, připomínek a zároveň za velkou trpělivost a ochotou při konzultacích poskytnutých ke zpracování této práce.

V Brně dne: 07.06.2020

.....

(podpis autora)

Obsah

1	Úvod	1
2	Návrh energeticky úsporného zařízení.....	2
2.1	Hardwarová část	2
2.2	Softwarová část	3
3	Kapková závlaha	5
3.1	Prvky zavlažovacího systému kapkové závlahy	6
3.1.1	Zdroj zavlažovací vody.....	6
3.1.2	Čerpadlo s filtry	7
3.1.3	Ventil.....	7
3.1.4	Kapkovač	7
3.2	Průzkum trhu	8
3.2.1	Hunter PRO-HC	8
3.2.2	TORO DDC WP Series	9
3.2.3	Rain Bird ESP RZX.....	10
4	Koncept řídicího systému.....	11
4.1	Blokové schéma.....	12
4.2	LilyGO TTGO e-ink T5	13
4.2.1	ESP32	14
4.3	Ovládání relé.....	15
4.3.1	TLE94112EL	16
4.4	MCP1703A.....	17
4.5	Externí RTC DS3231	18
4.6	Bistabilní relé	19
4.7	Čerpadlo	19
4.8	Ventily	20
4.9	Schéma navrženého řídicího systému	21
4.10	Teoretický návrh řídicího programu	22
5	Praktická realizace zařízení.....	23
5.1	Návrh desky plošného spoje.....	23
5.1.1	KiCad	23
5.1.2	Schéma	24
5.1.3	DPS.....	24
5.2	Řídicí systém.....	25
5.3	Ochranná krabice	25
5.3.1	SOLIDWORKS	25
5.3.2	Model ochranné krabice	25
6	Programové vybavení	27

6.1	Vývojové prostředí Visual Studio Code.....	27
6.2	Vývojové prostředí PlatformIO	27
6.3	Použité knihovny	28
6.4	Blokový diagram řídicího programu	29
6.5	Popis programu	30
6.5.1	Probuzení mikroprocesoru interním RTC.....	30
6.5.2	Probuzení mikroprocesoru tlačítkem nebo připojením napájení	31
6.6	Uživatelské rozhraní.....	31
6.7	Závlahový rozvrh	34
7	Energetická bilance.....	35
7.1	Teoretická energetická bilance	35
7.2	Návrh měření reálné spotřeby zařízení	37
7.2.1	Periodická sekvence Q_P	37
7.2.2	Asynchronní sekvence Q_A	38
7.2.3	Kontinuální spotřeba zařízení Q_K	38
7.2.4	Stanovení délky výdrže baterie	38
7.2.5	Metody měření malých odběrů	39
7.3	Reálná spotřeba zařízení	41
8	Zhodnocení dosažených výsledků.....	43
9	Závěr	45
	Literatura	46
	Seznam použitých zkratk.....	48
	Seznam příloh na CD	49

Seznam obrázků

Obrázek 1: Zpracování procesu ve sleep modu [1]	4
Obrázek 2: Blokový diagram jednoduchého systému kapkové závlahy	6
Obrázek 3: Řídicí jednotka Hunter PRO-HC [6]	8
Obrázek 4: Řídicí jednotka TORO DDC WP – 2 [7]	9
Obrázek 5: Řídicí jednotka Rain Bird ESP RZX [8]	10
Obrázek 6: Blokové schéma řídicího systému	12
Obrázek 7: Blokové schéma zavlažování	13
Obrázek 8: Blokové schéma čipu ESP32 [10]	14
Obrázek 9: Schéma H mostu [11]	15
Obrázek 10: Schéma jednoho půlmůstku obvodu TLE94112EL [12]	16
Obrázek 11: Kaskádní zapojení relé	17
Obrázek 12: Schéma regulátoru LM2596	18
Obrázek 13: Schématická značka DPDT relé [15]	19
Obrázek 14: Schéma řízení ventilu EQF 500 [17]	20
Obrázek 15: Schéma navrženého řídicího systému	21
Obrázek 16: Vytvořené schématické značky součástek	24
Obrázek 17: Vytvořená pouzdra součástek	24
Obrázek 18: Osazená DPS řídicího systému	25
Obrázek 19: 3D model krabičky	26
Obrázek 20: Blokový diagram řídicího programu	29
Obrázek 21: Struktura uživatelského menu	32
Obrázek 22: Menu vykreslené na displeji	32
Obrázek 23: Zapojení pro měření náboje	39
Obrázek 24: Zapojení pro měření proudu	40

Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozložení dat závlahového rozvrhu v paměti.....	34
Tabulka 2: Teoretická energetická bilance zařízení	36
Tabulka 3: Naměřené hodnoty spotřeby energie jednotlivých režimů	41

1 ÚVOD

Kvalitní závlaha je jedním ze základních požadavků pro správný růst rostlin a ovlivňuje množství plodin, které rostlina vyprodukuje. Jelikož se za poslední roky snížil výskyt dešťových srážek na zemi, a tím i hladiny toků a spodních vod, začíná být voda čím dál vzácnější. Proto mnoho velkých zemědělců, ale také menších pěstitelů přechází na systém kapkové závlahy, který dokáže dopravit vodu do těsné blízkosti rostliny, nebo přímo k jejím kořenům. Tímto systémem zavlažování dojde k nemalé úspoře vody.

Systémy kapkové závlahy jsou již dobře zaběhnuté a rozšířené. Problém nastává v implementaci takového systému do oblastí, kde nejsou dostupné inženýrské sítě, konkrétně voda a elektřina. Absence vodovodního řádu se dá vyřešit jednoduše vykopáním studny či hlubinného vrtu v místě potřeby. Výstavba jímací nádrže pro dešťovou vodu je také jednou z možností. Absence elektrické přípojky je mnohem větší problém. Konvenční závlahové systémy nejčastěji využívají klasickou elektrickou síť 240 V. Zde nastává problém implementace závlahového systému v odlehlých oblastech, polích nebo sadech, kde většinou žádné inženýrské sítě nejsou, a kapková závlaha je v takových oblastech potřeba. Pro takové případy je nutné vytvořit systém, který bude velice úsporný a bude pracovat s 12 V napětím z baterek, nebo solárních panelů. Protože řídicí systémy jsou většinou umístěny venku (popřípadě v nějaké stodole či garáži), měly by být odolné vůči vlivům počasí, zejména teplotě. Jednoduchost ovládání a intuitivní nastavení je také nutností. Systém by měl umožňovat nastavení rozvrhu závlahy včetně nastavení délky závlahového intervalu.

2 NÁVRH ENERGETICKY ÚSPORNÉHO ZAŘÍZENÍ

Pro návrh zařízení, které má pracovat v režimu nízké spotřeby, je potřeba dodržet několik kroků. Zařízení, které je napájeno pomocí bateriového zdroje, by mělo pracovat ve speciálním režimu, který je kompromisem mezi následujícími protikladnými požadavky:

- okamžitá odezva na externí podnět,
- vysoký výpočetní výkon,
- nízká spotřeba.

Návrhář elektrického systému může ovlivnit celkovou spotřebu systému především optimalizací obvodového návrhu, ale také optimalizací softwarové části zařízení. [1]

2.1 Hardwarová část

Správným obvodovým návrhem systému značnou částí ovlivníme výslednou spotřebu celého zařízení. Hardwarová část obvodu je odpovědná za okamžitou spotřebu zařízení, ať už se nachází v režimu nečinnosti, nebo režimu aktivním. Návrhář tedy musí pečlivě vybrat vhodné komponenty z hlediska spotřeby v době provozu i v době nečinnosti.

Moderní elektronické prvky se vyznačují minimální spotřebou, ale mohou být dražší než starší prvky se stejnou funkcionalitou. Produkty vhodné pro použití k bateriovému napájení nazývají jejich výrobci různě. Můžeme se tedy setkat s pojmy jako: “nanoWatt technology”, “ultra-low-power-mode”, “LowPower”, “eXtreme-LowPower” atd.

Elektronické prvky, které výrobci označují za prvky s minimální spotřebou, mají kromě svých výhod také nevýhody. Výrobci začali minimální spotřeby využívat jakožto reklamního taháku a většina dnešních elektrických prvků má na přední straně katalogového listu uveden některý z výše uvedených pojmů. Po bližším zkoumání však zjistíme, že některé prvky dosahují nízké spotřeby pouze za určitých podmínek. V některých případech jsme dokonce nuceni úplně omezit veškerou funkcionalitu prvku pro dosažení nízké spotřeby udávané výrobcem. Z takového, na první pohled energeticky úsporného a komplexního prvku získáváme prvek sice energeticky úsporný, ale se značně omezenou funkcionalitou.

Volbou moderního prvku s minimální spotřebou můžeme dosáhnout nižší okamžité spotřeby, a tím také docílit energetické úspornosti celého zařízení. [1]

2.2 Softwarová část

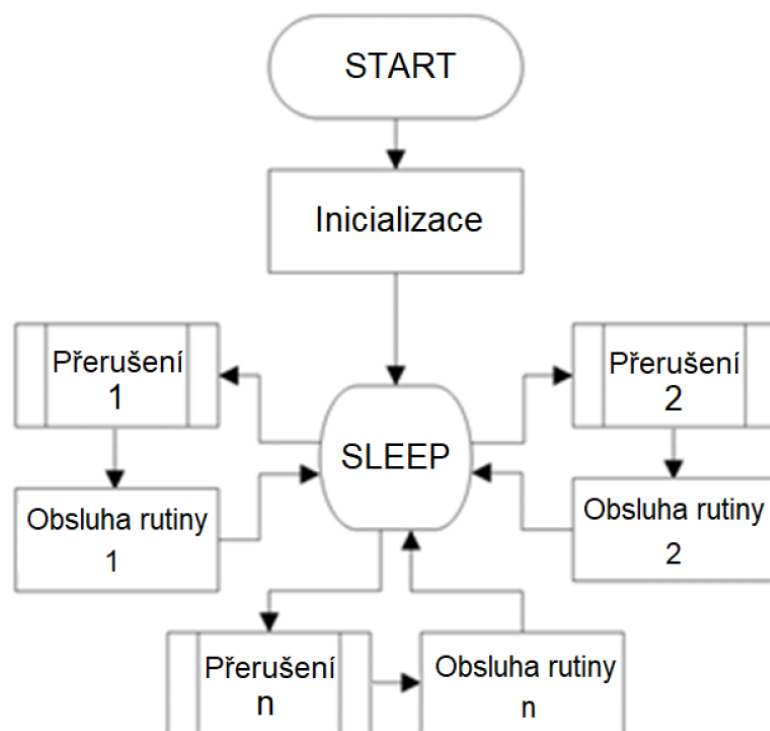
Softwarová část zařízení je neméně důležitou částí pro vytvoření energeticky úsporného zařízení. Špatným návrhem programového vybavení lze proměnit zprvu energeticky úsporně vyhlížející systém v naprosto neúsporný a neefektivní. Systémy pracující s bateriovým napájením, tedy v módu nízké spotřeby, většinou zpracovávají jednotlivé procedury odlišným způsobem než v režimu síťového napájení. [2]

Systémy pracující s bateriovým napájením hojně využívají tzv. sleep mode, ve kterém je zařízení uspáno, veškeré nepotřebné části jsou odstaveny od napájení a zařízení čeká na externí podnět pro probuzení. Spotřeba takového zařízení ve sleep modu se pohybuje v řádech μA . Mezi externí podněty pro probuzení zařízení patří například:

- změna logické úrovně na digitálním vstupu,
- překročení napěťové úrovně komparátoru,
- časová inkrementace modulu RTC (Real Time Clock),
- časová událost prostřednictvím nízkoodběrového oscilátoru,
- překročení hodnot snímačů,
- pohyb zaznamenaný akcelerometrem. [1]

Optimální řešení provozu systému v nízkoodběrovém režimu spočívá v následujících bodech:

- schopnost vyvolat přechod z nečinného do aktivního módu při minimálním proudovém odběru,
- rychlý přechod do procesně výkonného (aktivního) režimu,
- provedení obsluhy bez zbytečného prodlení v nejkratší možné době,
- nastavení potřebných parametrů pro další možnost probuzení,
- bezodkladný návrat do režimu nízkého odběru. [1]



Obrázek 1: Zpracování procesu ve sleep modu [1]

Systém je po provedení úvodní inicializace uveden do stavu nečinnosti. V tomto módu zůstávají aktivní pouze nezbytné moduly, například: vstupní porty (IO), nízkoodběrový časovač (LPO), modul reálného času (RTC) či komparátor. V okamžiku přijetí externího asynchronního podnětu je systém probuzen, nastaví potřebnou periférii, obslouží procedury, inicializuje parametry potřebné k opětovnému probuzení a je opět uveden do stavu nečinnosti. [1]

3 KAPKOVÁ ZÁVLAHA

Kapková závlaha je jednou z moderních a nejvíce používaných možností zavlažování plodin, rostlin a stromů. Své uplatnění najde na malých zahrádkách, ale také na velkých pěstebních polích a farmách. Její nespornou výhodou je úspora času, energie, ale rovněž vody a financí. [3]

Jedná se o vysoce účinnou zavlažovací metodu založenou na častém dávkování malého množství vody přímo ke kořenům rostliny, nebo do jejich okolí. Rostlina dostává přesně takové množství vody, které dokáže vstřebat a které potřebuje ke svému růstu. Díky této metodě se zabrání zbytečnému vypařování a ztrátě vody, a dojde tak k úspoře až dvou třetin vody v porovnání s klasickou zálivkou. [3]

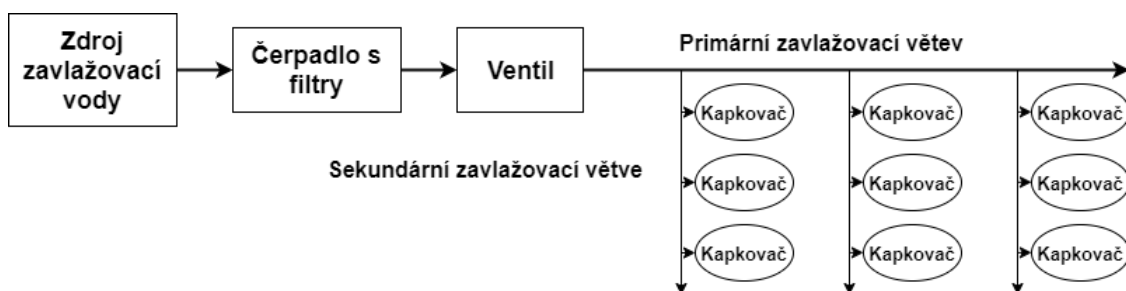
Výhody kapkové závlahy oproti jiným druhům zavlažování: [4]

- Frekvence zavlažování je vyšší a voda je přivedena přesně tam, kde rostliny potřebují (do blízkosti kořenů). Rostliny proto lépe rostou.
- Substrát zůstává trvale vlhký a netrpí „vodním stresem“.
- Nedochází k velkému odpařování vody a ztrátám vody odtokem nebo vsakováním do okolí rostliny.
- Protože se jedná o automatický systém, zalévání je pohodlnější a méně pracné. Pokud do systému implementujeme řídicí systém, není také vyžadována naše přítomnost v čase zálivky.
- Dochází k menší erozi půdy (voda necirkuluje na povrchu půdy) a menší ztrátě živin v půdě (nedochází k odplavování a vsakování živin hlouběji do půdy).
- Dochází k významné redukci růstu plevelů. Protože je voda aplikována pouze v okolí rostliny, okolní oblasti zavlažovány nejsou a plevel nedostává potřebné množství vody k růstu.
- Systém kapkové závlahy lze použít pro aplikaci tekutých hnojiv. Dochází také k jejich úspoře z důvodu dávkování vody s hnojivem přímo k rostlině.
- Protože kapková závlaha aplikuje vodu přímo do půdy, nebo na její povrch, zabraňuje tak tvorbě plísňových onemocnění listů a stonků rostlin.

Nevýhody kapkové závlahy oproti jiným druhům zavlažování: [4]

- Počáteční náklady na instalaci jsou vyšší (ačkoli jsou v dlouhodobém horizontu kompenzovány úsporou vody a času).
- Zavlažovací voda musí být zbavena hrubých nečistot a nesmí obsahovat příliš mnoho solí nebo minerálů, aby nedocházelo k zanášení kapkovačů. Systém tedy musí obsahovat alespoň filtry hrubých nečistot, což zvýší pořizovací náklady.
- Jedná se o pevný zavlažovací systém, takže po jeho aplikaci nelze půdu strojově obdělávat. Pokud se provádí jakákoli práce s rostlinami nebo okolo nich, musí být prováděna opatrně, aby nedošlo k poškození závlahového systému.

3.1 Prvky zavlažovacího systému kapkové závlahy



Obrázek 2: Blokový diagram jednoduchého systému kapkové závlahy

Jak můžeme vidět na obrázku 2, systém kapkové závlahy není nikterak složitý. Na výrobu nejjednoduššího systému kapkové závlahy nám postačí děrovaná vodovodní hadice a zdroj vody s kohoutkem.

3.1.1 Zdroj zavlažovací vody

Jako zdroj vody pro kapkovou závlahu často slouží vodovodní řad. Je to především z toho důvodu, že pro správnou funkci systému už není zapotřebí čerpadlo. Využití vodovodního řadu přináší také další benefit. Voda ve vodovodním řadu je zbavena mechanických nečistot, a tak není zapotřebí do systému zařazovat filtr hrubých nečistot. Voda z vodovodního řadu často má vysoký obsah chlóru, který slouží k dezinfekci vody. Taková voda však není úplně vhodná pro zálivku. Některé rostliny vysokou koncentrací chlóru špatně snášejí.

Vhodnější variantou zavlažovací vody je použití dešťové nebo podpovrchové vody. Dešťová voda bývá často jímána do různých nádob nebo nádrží.

Pomocí čerpadla lze tuto vodu pohodlně čerpat z nádrže do místa potřeby. Dešťová voda ale bývá často znečištěna různě velkými mechanickými nečistotami. Při čerpání vody je proto nutné před čerpadlo zařadit několik filtrů, které tyto hrubé nečistoty odfiltrují, aby nedocházelo k ucpávání kapkovačů.

3.1.2 Čerpadlo s filtry

Pro napájení systému kapkové závlahy se používají čerpadla s vysokým průtokem. Čerpadla mohou být nízkotlaká, protože systémy kapkové závlahy pracují s nízkými tlaky. Pro některé kapkové hadice a kapkovače je určen maximální provozní tlak 0,8 baru. Volba konkrétního čerpadla vždy záleží na individuálním návrhu systému. Použití filtrů pevných částic, popřípadě minerálů se velice doporučuje. Pevné částice mohou způsobit zanesení kapkovačů, a tím snížit jejich průtok, nebo je zcela ucpat. [5]

Systém kapkové závlahy se dá také sestavit bez čerpadla, a to s využitím gravitace. Pokud je nádrž s vodou umístěna výše, než jsou kapkovače, můžeme této příležitosti využít a nechat vodu téct do kapkovačů samospádem. Použití filtrů se ale nevyhne.

3.1.3 Ventil

Nejjednodušším ventilem, který se dá v systému kapkové závlahy použít, je vodovodní kohoutek. Pokud chceme provádět závlahu, mechanicky kohoutkem otočíme do polohy otevřeno. Moderní systémy kapkové závlahy však využívají k řízení závlahy řídicí systémy. Proto se v systémech kapkové závlahy často využívají elektromagnetické ventily, které jsou ovládány řídicí jednotkou.

3.1.4 Kapkovač

Jedná se o koncový prvek celého systému, který zajišťuje postupné uvolňování (kapkování) vody ze zavlažovací hadice. Nejjednodušší kapkovač představuje díra v hadici. Pokud máme rostliny vysázeny v řadě, povedeme podél rostlin hadici a do této hadice vytvoříme směrem k rostlinám díry ve stejném rozestupu, jako jsou vysázeny rostliny. Takto perforovaná hadice nám bude zajišťovat zavlažování rostlin v jejich těsné blízkosti.

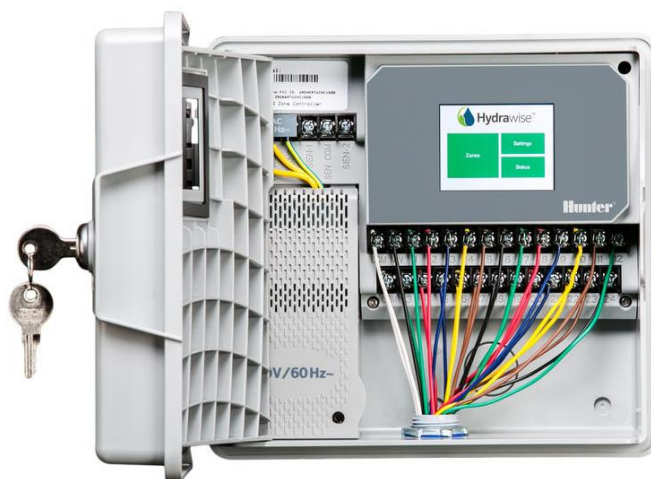
Existují ale také sofistikovanější zařízení, která se připojují k hadici pomocí T spoje. Taková zařízení nám poskytnou například regulovatelné množství uvolněné vody z hadice. Mohou také obsahovat omyvatelné filtry hrubých nečistot, tudíž nedochází k zanesení kapkovací trysky.

3.2 Průzkum trhu

Pro porovnání navrhovaného systému s již existujícími systémy byly vybrány řídicí jednotky běžně dostupné na českém trhu, které se vyznačují podobnými funkcemi.

3.2.1 Hunter PRO-HC

Řídicí jednotka PRO-HC od firmy Hunter je poloprofesionální řídicí systém závlahových systémů. Jednotka se vyrábí v provedení jak pro umístění do interiéru, tak pro umístění do exteriéru. Její hlavní výhodou je možnost jednotku připojit přes Wi-Fi do lokální sítě a provádět tak nastavování z počítače, notebooku nebo chytrého telefonu.



Obrázek 3: Řídicí jednotka Hunter PRO-HC [6]

Řídicí jednotka se vyrábí v provedeních pro připojení 6, 12 nebo 24 elektromagnetických ventilů. Pro programování jednotka nabízí 6 programů a 6 startovacích časů pro každý program. Mimo výstupy pro elektromagnetické ventily jednotlivých větví zavlažování má jednotka také samostatný výstup pro hlavní ventil s označením MV (master valve). MV výstup se dá využít buďto pro připojení hlavního ventilu, který bude uzavírat hlavní přívod vody, nebo pro připojení čerpadla. Tento výstup však poskytuje pouze 24 V a 0,28 A. Hodí se tak spíše pro připojení ovládacího relé pro čerpadlo, nikoli čerpadla samotného. Jednotka také nabízí 2 vstupy pro senzory. Do zařízení lze zapojit senzory průtoku, deště nebo teploměr. Tyto senzory pomáhají zdokonalovat zavlažování a poskytují nám zpětnou vazbu. [6]

Pro programování zařízení je možné využít integrovanou dotykovou obrazovku, nebo lze zařízení programovat prostřednictvím Wi-Fi. Díky Wi-Fi připojení je možné jednotku připojit do veřejné sítě meteostanic (Weather Underground). Zde má jednotka přístup k aktuálním datům a informacím o počasí.

Na základě těchto informací může jednotka sama upravovat nastavené rozvrhy zavlažování, což v důsledku představuje další úsporu vody. [6]

Kvůli těmto pokročilým funkcím a nutnosti jednotku nepřetržitě napájet 240 V ze sítě, není tento řídicí systém zamýšlen jako úsporné zařízení. Hodí se tedy spíše do míst, kde je snadný přístup k inženýrským sítím.

3.2.2 TORO DDC WP Series

Série řídicích systémů DDC WP od společnosti TORO je určena pro běžné a nenáročné uživatele. Jedná se o jednotku pro umístění jak do interiéru, tak do exteriéru. Řídicí systém sice neobsahuje žádné pokročilé funkce, jako je například připojení k síti Wi-Fi, avšak má jednu obrovskou výhodu. Ke své funkci nepotřebuje síťové napájení. Vystačí si se dvěma 9 V bateriemi a jednou interní baterií pro zálohu programu. [7]



Obrázek 4: Řídicí jednotka TORO DDC WP – 2 [7]

Řídicí jednotka se vyrábí v provedeních pro připojení 2, 4, 6 a 8 elektromagnetických ventilů a certifikací IP 68. Pro programování jednotka nabízí tři programy, týdenní rozvrh, 1–7denní interval, zalévání v liché/sudé dny a tři startovací časy pro každý program. K jednotce lze také připojit dešťový a teplotní senzor. Jednotka je vybavena speciální funkcí pro detekci zbývajících energie v baterii. Pokud energie nestačuje pro otevření a znovuzavření ventilu, jednotka nespustí zavlažování a informuje na displeji o nízkém stavu baterie. [7]

Tento řídicí systém najde své uplatnění v místech bez přístupu k elektrické energii. Výrobce uvádí výdrž řídicí jednotky na dvě 9 V baterie po celou zavlažovací sezónu. Systém obsahuje jednoduché, ale intuitivní funkce programování.

3.2.3 Rain Bird ESP RZX

Série řídicích systémů RZX od společnosti Rain Bird je rovněž určena pro běžné a nenáročné uživatele. Jednotka se vyrábí v provedení jak pro umístění do interiéru, tak pro umístění do exteriéru. Řídicí systém potřebuje ke své funkci síťové napájení 240 V. Pro zálohu programu slouží 2 x AAA baterie. Programování zařízení je také možné bez připojení k síti, a to za předpokladu použití energie z baterií. [8]



Obrázek 5: Řídicí jednotka Rain Bird ESP RZX [8]

Řídicí jednotka se vyrábí v provedeních pro připojení 2, 4, 6 a 8 elektromagnetických ventilů. Pro programování jednotka nabízí 4 programy a 6 startovacích časů pro každý program. Systém nabízí pokročilé funkce programování, jako je například kopírování již naprogramovaného rozvrhu ventilu na jiný ventil. Těmito funkcemi se výrobce snaží zjednodušit a urychlit programování zařízení. Ovládací panel obsahuje také tlačítko pro manuální spuštění zavlažování mimo naprogramovaný časový rozvrh. Zařízení také obsahuje výstup MV (master valve) pro připojení hlavního ventilu ovládajícího hlavní přívod vody, nebo připojení ovládacího relé pro čerpadlo. K jednotce lze také připojit několik čidel, jako například dešťový senzor nebo senzor vlhkosti půdy. Zařízení se dá rozšířit pomocí Wi-Fi modulu, díky němuž je poté možné programovat a provádět kontrolu nad zařízením vzdáleně. [8]

Systém není určen pro obsáhlé závlahové systémy, ale poskytuje pokročilé funkce. Své uplatnění si tak najde u běžných uživatelů, kteří chtějí využívat těchto pokročilých funkcí. Systém ke své činnosti potřebuje zdroj energie, není proto vhodný pro implementaci do míst bez přístupu k elektrické energii.

4 KONCEPT ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

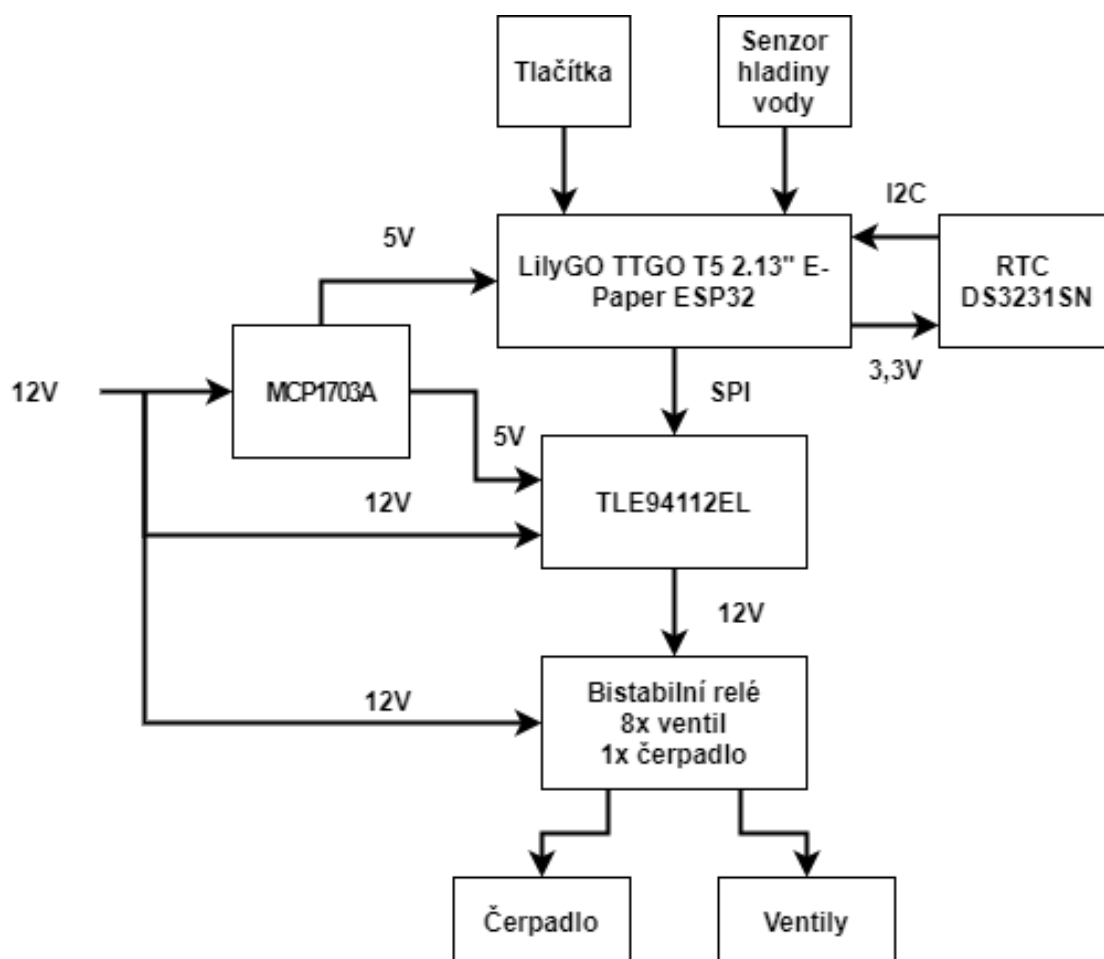
Řídicí systém bude navržen jako kompaktní samočinná jednotka, která bude vyžadovat pouze 12 V napájení. Bude umožňovat tvorbu rozvrhů závlahy, připojení osmi ventilů pro ovládání větví závlahy a připojení 12 V čerpadla na vodu.

Srdcem celého systému bude mikrokontrolér LilyGO TTGO T5 s mikroprocesorem ESP32 a 2,13" e-ink displejem. Tento mikrokontrolér bude zajišťovat propojení celého systému s uživatelem a přes SPI bude komunikovat s obvodem TLE94112EL, který zajišťuje ovládání relátek pro ventily a čerpadlo. Mikrokontroléru bude sekundovat externí modul RTC s obvodem DS3231SN. RTC modul bude sloužit k určení reálného času a jeho záloze v případě výpadku napětí. S využitím externího modulu RTC budou spouštěny jednotlivé rozvrhy kapkové závlahy. Pro obsluhu jednotlivých ventilů a čerpadla budou využita bistabilní relé. Aby se zamezilo chodu čerpadla na prázdno, systém bude také zajišťovat kontrolu výšky hladiny vody pomocí plováčkového senzoru výšky hladiny.

Co se týče softwarové části, systém by měl uživateli poskytnout jednoduché a intuitivní prostředí pro tvorbu rozvrhů závlahy. Délka jednotlivých závlah by měla být také konfigurovatelná. Mikrokontrolér bude kontrolovat výšku hladiny v nádrži pro vodu. V případě nízké hladiny, která by mohla způsobit zničení čerpadla, mikrokontrolér nedovolí spuštění čerpadla (závlahy) a informuje o tomto stavu uživatele pomocí upozornění na e-ink displeji.

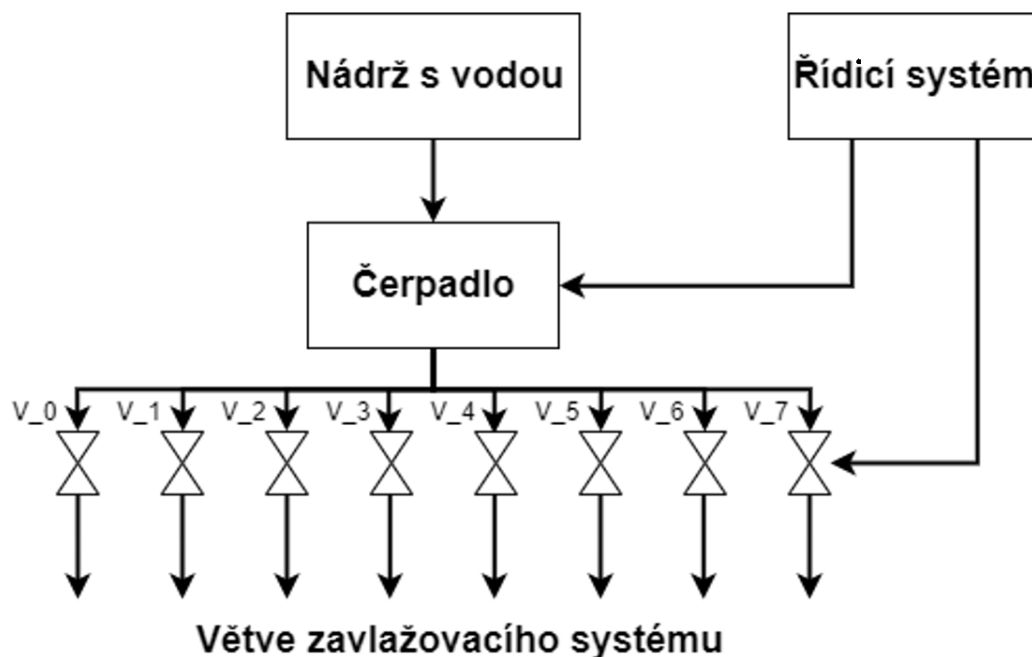
Protože bude řídicí systém napájen z 12 V baterií, případně solárních panelů, bude hlavní důraz kladen na energetickou úspornost celého zařízení.

4.1 Blokové schéma



Obrázek 6: Blokové schéma řídicího systému

Celý řídicí systém se dá pomyslně rozdělit do čtyř hlavních částí. První část jsou řídicí prvky, mikrokontrolér LilyGO TTGO T5 a obvod pro řízení relé TLE94112EL. Druhým blokem je modul RTC DS3231SN zajišťující reálný čas pro mikrokontrolér a zálohu reálného času. Třetím blokem jsou bistabilní relé, která zajišťují spínání 12 V napětí potřebného pro ovládání ventilů a čerpadla. Poslední částí je napájecí část s obvodem MCP1703A. Tento obvod zajišťuje přeměnu 12 V na 5 V napětí potřebného pro napájení ostatních obvodů a logiky.



Obrázek 7: Blokové schéma zavlažování

Na obrázku 7 můžeme vidět rozložení závlahového systému. Čerpadlo umístěné v nádrži s vodou je ovládáno spolu s ventily řídicím systémem. Řídicí systém zajišťuje otevírání a zavírání jednotlivých větví závlahového systému dle časového rozvrhu a spínání čerpadla. Jednotlivé časové rozvrhy jsou nastaveny uživatelem pomocí tlačítek a rozhraní na e-ink displeji.

4.2 LilyGO TTGO e-ink T5

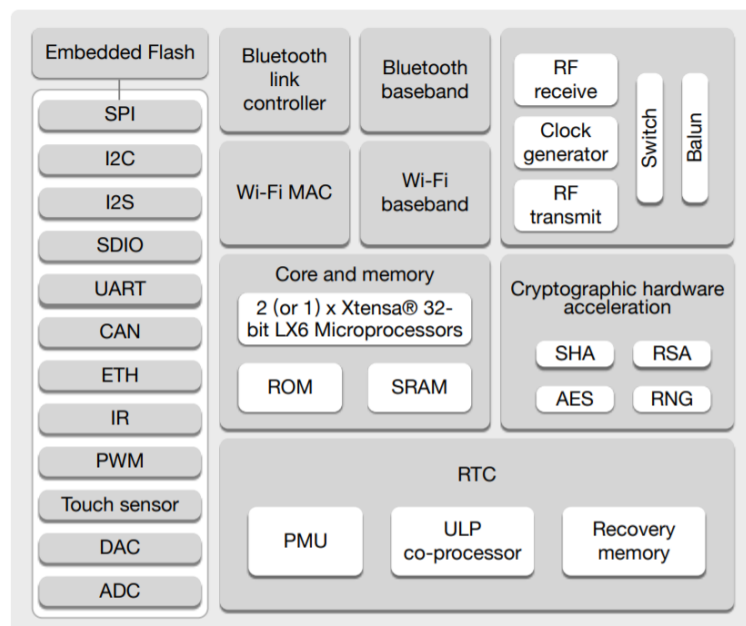
Jedná se o mikrokontrolér s mikroprocesorem ESP32 a integrovaným e-ink displejem. Tento mikrokontrolér je navržen pro aplikace, kde požadujeme vysokou energetickou úspornost, a pro aplikace, kde nepotřebujeme rychle se měnící informace na displeji, protože kompletní vykreslení displeje se pohybuje v řádech sekund. Mikrokontrolér využívá z čipu ESP32 Wi-Fi se standardem 802.11 b/g/n/e/i, Bluetooth ve verzi 4.2 a tzv. BLE (Bluetooth Low Energy). Multiplexované vstupně-výstupní porty nabídnou 18 kanálů A/D převodníku, 3x SPI rozhraní, 3x UART rozhraní, 2x I2C rozhraní, 2x I2S rozhraní, 16x výstup s PWM modulací a 2x D/A převodník. Mikrokontrolér spotřebovává při přepisu displeje zhruba 5 mA, ve sleep módu se jedná o méně než 400 μ A. Mikrokontrolér je taktéž připraven na připojení externí baterie za účelem udržení jeho funkčnosti i mimo napájení pomocí USB. [9]

4.2.1 ESP32

Jedná se o čip integrující 2,4 GHz Wi-Fi, Bluetooth a Xtensa dvoujádrový 32bitový procesor. Tento čip byl designován vysoce low-power 40nm technologií. Byl vyvinut zejména pro aplikace, kde je důležitá nízká spotřeba energie. Jedná se například o nositelnou elektroniku, chytré hodinky, bezdrátová sluchátka, chytré osvětlení, čidla pro „inteligentní domy“, různé snímače životních funkcí jako jsou například nositelné měřiče tepu atp. Hlavní výhodou tohoto čipu je, že může většinu času pracovat v tzv. sleep módu. Z tohoto vysoce úsporného módu může být probouzen periodicky, nebo nějakou specifickou situací, například výstupem čidla.

Hlavními prvky čipu jsou 2,4 GHz Wi-Fi standardu 802.11 b/g/n/e/i, Bluetooth ve verzi 4.2 2 a tzv. BLE (Bluetooth Low Energy). Čip obsahuje několik pamětí, a to 448 kB paměti ROM, 520 kB paměti SRAM a 16 kB paměti SRAM pro RTC. Čip také obsahuje interní 8 MHz oscilátor s kompenzací, interní RC oscilátor s kompenzací, externí 2 MHz ~ 60 MHz krystalový oscilátor, externí 32 kHz krystalový oscilátor pro RTC s kompenzací. Dále obsahuje dvě skupiny časovačů: 2x 64-bitový časovač a jeden watchdog pro každou skupinu. Posledními z časovačů je jeden RTC časovač a RTC watchdog.

Co se týče periferních rozhraní, čip je vybaven 34 plně programovatelnými vstupně-výstupními porty, které nabídnou 12-bitový A/D převodník v 18 kanálech, 2x 8-bitový D/A převodník, 10x vstup pro dotykový senzor, 4x SPI rozhraní, 2x I2C rozhraní, 2x I2S rozhraní, 3x UART, PWM pro ovládání motorů, 16 PWM kanálů pro ovládání LED diod, vstup pro Hallovu sondu a ethernet MAC rozhraní s podporou DMA a IEEE 1588. [10]



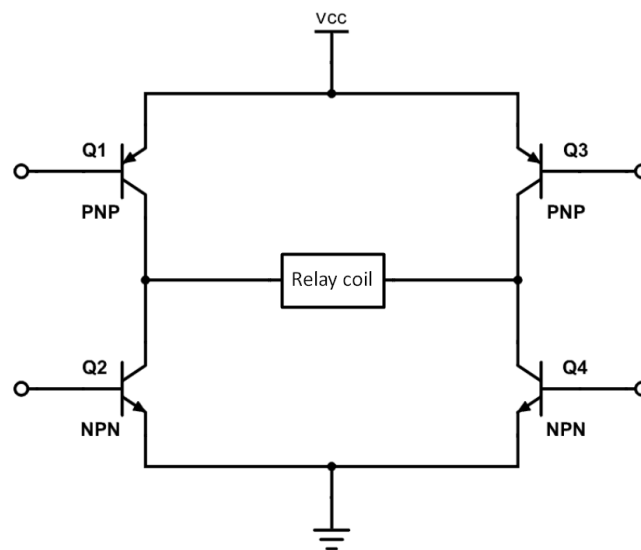
Obrázek 8: Blokové schéma čipu ESP32 [10]

4.3 Ovládání relé

V první verzi návrhu byla pro ovládání ventilů uvažována klasická elektromagnetická relé typu SPDT (relé s jedním přepínacím kontaktem), která měla kotvu uváděnou do původního stavu pomocí pružiny. Tato relé by byla ovládána přímo pomocí mikrokontroléru. Takovéto řešení by bylo sice jednoduché a levné, ale neodpovídalo by požadavku na energetickou úspornost. Cívka relé by musela být sepnuta po celou dobu, kdy by byla daná větev kapkové závlahy aktivní a prováděla zavlažování. Doba zavlažování se pohybuje v řádech desítek minut a takto dlouhá doba sepnutí cívky by byla značně neúsporná, co se energie týče.

Druhý návrh už tedy počítal s bistabilními SPDT relé. Tato relé mohou být přepínána mezi svými stavy pouze krátkými impulzy, což je pro naše potřeby vyhovující. Cívka bude napájena pouze po nezbytně nutnou dobu pro překlopení relé a po zbytek závlahového času bude cívka neaktivní. Ovládání takových relé je však mnohem složitější, jelikož je třeba pro změnu stavu cívku relé přepólovat.

V druhém návrhu byl tedy k přepólování bistabilních relé uvažován H most.



Obrázek 9: Schéma H mostu [11]

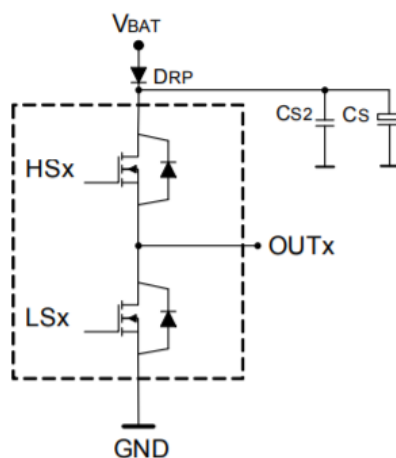
Tento most se skládá ze 4 tranzistorů. H most se používá také pro řízení DC motorů. Pro naši aplikaci by postačovaly řídit vždy jen dvojice tranzistorů. K tomuto už nám však samotný mikrokontrolér nepostačí. Na ovládání jednoho relé bychom potřebovali dva i/o piny mikrokontroléru. V počtu 8 relé tedy 16 i/o pinů. Takové množství nám ale LilyGO TTGO T5 neposkytne. Jedním z řešení by bylo použití dekodéru 1 z 16. Pomocí 4 adresních vodičů by bylo možné ovládat všech 8 relé. Celý tento systém byl navržen z diskrétních součástek a zde nastal největší kámen

úrazu. Vzhledem k tomu, že byl obvod sestaven z diskretních součástek, nebylo možné zajistit, že v některých případech nebude docházet k hazardním stavům. Tyto hazardy by mohly způsobovat nechtěné přepólování relé, ale také zkratování 12 V napětí na zem. Z tohoto důvodu bylo použito obvodu složeného z diskretních součástek nemožné. [11]

Proto bylo nutné hledat jiné řešení. Nakonec bylo vybráno modernější řešení H mostu v integrovaném obvodu. Obvod TLE94112EL komunikuje přes SPI a obsahuje 12 půl mostů, které mohou být využity pro vytvoření až 11 (při kaskádním zapojení) H mostů pro řízení relé.

4.3.1 TLE94112EL

TLE94112EL je integrovaný obvod s dvanácti půlmůstky. Tento obvod je speciálně určen pro aplikace s DC motory, jelikož je vybaven několika režimy pro práci s nimi. Režim vpřed, vzad, brzda a vysoká impedance. Obvod také nabízí spousty diagnostických funkcí, jako jsou kontrola zkratu na zem, zkratu na napájecí napětí, nepřipojeného zařízení, přehřátí nebo výpadek napájecího napětí. Lze jej ale také využít pro aplikace s relátkami nebo LED diodami. [12]



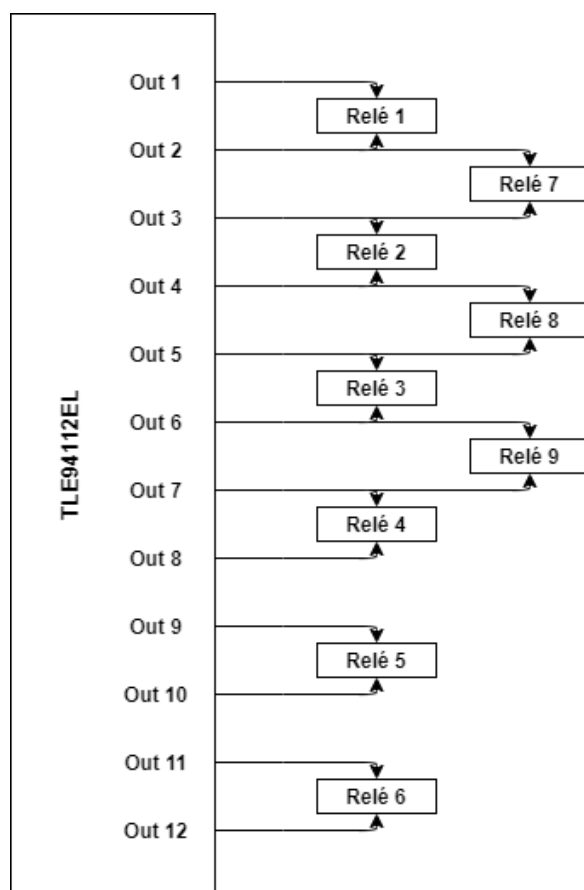
Obrázek 10: Schéma jednoho půlmůstku obvodu TLE94112EL [12]

Obvod komunikuje s mikrokontrolérem pomocí 16-bitového SPI rozhraní. Bajtová adresa je následována bajtem dat. Pro kontrolu nad funkcí jednotlivých půlmůstků obsahuje obvod několik registrů. Jelikož budou tímto obvodem obsluhována relé a nebudou využity pokročilé funkce, které jsou určeny především pro ovládání motorů, budou využity pouze tři osmibitové registry, z nichž každý obsluhuje čtveřici půlmůstků.

Velikou výhodou tohoto obvodu je také možnost uvést ho do režimu spánku. Toho se dá docílit přivedením logické nuly na pin EN. Obvod v režimu spánku

spotřebovává pouze typicky $0,6 \mu\text{A}$ maximálně $3 \mu\text{A}$. Tento proud zajišťuje napájení pouze nezbytných částí obvodu a ostatní části, jako jsou například napěťové pumpy pro tranzistory, jsou od napájení odstaveny. Toto se hodí především v aplikacích, kde požadujeme vysokou energetickou úspornost. [12]

Protože integrovaný obvod obsahuje pouze 12 půlmůstků a k řízení osmi relé je jich zapotřebí 16, využijeme možnost zapojení relé do kaskády. Při kaskádním zapojení lze tímto driverem řídit až 11 bistabilních relé současně.



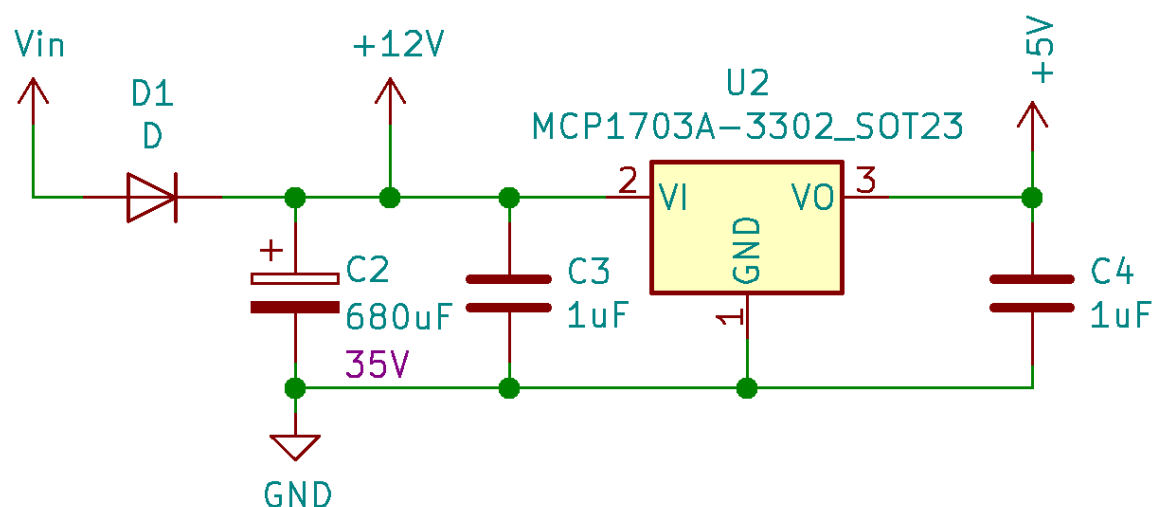
Obrázek 11: Kaskádní zapojení relé

4.4 MCP1703A

MCP1703A je lineární regulátor napětí s nízkým úbytkem. K jeho funkci nejsou zapotřebí žádné externí součástky kromě kondenzátoru na vstupu a výstupu. Vstup do regulátoru může být v rozsahu $2,7 \text{ V}$ až 16 V , čímž plně vyhovuje požadavku pro vstupní napětí 12 V . Při vstupním napětí 12 V je regulátor schopen dodávat proud až 250 mA . Velkou výhodou tohoto regulátoru je klidový proud typicky $2 \mu\text{A}$. Regulátor se proto hodí do bateriově napájených zařízení, nebo zařízení, kde je potřeba nízká spotřeba. [13]

Regulátor se vyrábí v několika verzích. Pro tuto aplikaci bude využita verze 5002E, která má výstupní napětí 5 V, které je potřeba k napájení mikrokontroléru a driveru pro řízení relé. Regulátor je vybaven tepelnou ochranou a ochranou proti zkratu.

Na obrázku 12 je schéma zapojení tohoto regulátoru v navrhovaném obvodu. Jedná se o klasické doporučené zapojení regulátoru výrobcem. Kondenzátor C2 slouží pro pokrytí poklesů vstupního napětí zapříčiněných například sepnutím relétek. Dioda D1 zajišťuje ochranu proti vybíjení kondenzátoru C2 zpět do obvodu v případě poklesu vstupního napětí.



Obrázek 12: Schéma regulátoru LM2596

4.5 Externí RTC DS3231

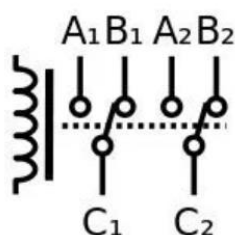
Pro sledování reálného času bude v projektu využita kombinace RTC obvodu DS3231 a paměťového modulu AT24C32. Oba obvody jsou umístěny společně s baterií pro zálohu času a data na jednom modulu. Modul s mikrokontrolérem komunikuje přes I2C sběrnici a je napájen 3,3 V přímo z výstupu mikrokontroléru.

Obvod DS3231 bude v projektu využit hlavně kvůli jeho vynikající přesnosti a teplotní kompenzaci. Umístění řídicího systému se předpokládá v exteriéru, rozsah teplot tedy bude značný. V projektu bude využit konkrétně typ DS3231SN, který je určen pro použití při teplotách od -40 °C do 85 °C.

RTC obsahuje sekundy, minuty, hodiny, dny, den v měsíci, měsíc a rok. Datum je automaticky upraveno pro měsíce, které mají méně než 31 dní. RTC hlídá také přestupné roky. Formát času může být zvolen na 12h nebo 24h. Obvod obsahuje také dva programovatelné budíky (přerušení) a generátor obdélníkového signálu, tyto ale nebudou v projektu využity. [14]

4.6 Bistabilní relé

Jak už bylo zmíněno v kapitole 4.3 Ovládání relé, pro tento návrh byly vybrány SPDT bistabilní relé. Z finančních důvodů však byla SPDT relé nahrazena za DPDT relé (relé se dvěma přepínacími kontakty). Tato změna nijak neovlivní chování systému, druhý přepínací kontakt každého relé zůstane nevyužit.



Obrázek 13: Schématická značka DPDT relé [15]

Elektromagnetické bistabilní DPDT relé se skládá z cívky (elektromagnetu) a dvou přepínacích kontaktů. Klasické elektromagnetické DPDT relé má jeden stabilní stav. Při přivedení napětí na cívku, klasické relé změní svůj stav (např. vstup C1 je přepnut na výstup B1 a vstup C2 na výstup B2). Pokud je napětí od cívky odpojeno, relé se vrátí do svého původního stabilního stavu (např. vstup C1 je přepnut na výstup A1 a vstup C2 na výstup A2) pomocí pružiny. Zatímco bistabilní elektromagnetické DPDT relé má dva stabilní stavy. Při přivedení napětí na cívku, relé změní svůj stav. (např. vstup C1 je přepnut na výstup B1 a vstup C2 na výstup B2). Pokud je napětí od cívky odpojeno, relé svůj stav nezmění, nýbrž setrvává v předchozím stavu. Pro změnu stavu bistabilního relé je zapotřebí přivést na cívku napětí opačné polarity než napětí, které uvedlo relé do daného stavu. Při přivedení takového napětí na cívku změní relé svůj stav (např. vstup C1 je přepnut na výstup A1 a vstup C2 na výstup A2) a setrvává v tomto stavu až do dalšího přepólování cívky. [15]

Z popisu funkce bistabilního relé vyplývá, že ke změně stavu relé postačuje cívku napájet pouze po takovou dobu, která je nutná k přepnutí stavu relé. Pokud se relé přepne do požadovaného stavu, není nutné dále cívku napájet. Tohoto je využito i při tomto návrhu, kdy cívky relé budou napájeny pouze po dobu nutnou k přepnutí stavu, a tím dojde k podstatné úspoře energie.

4.7 Čerpadlo

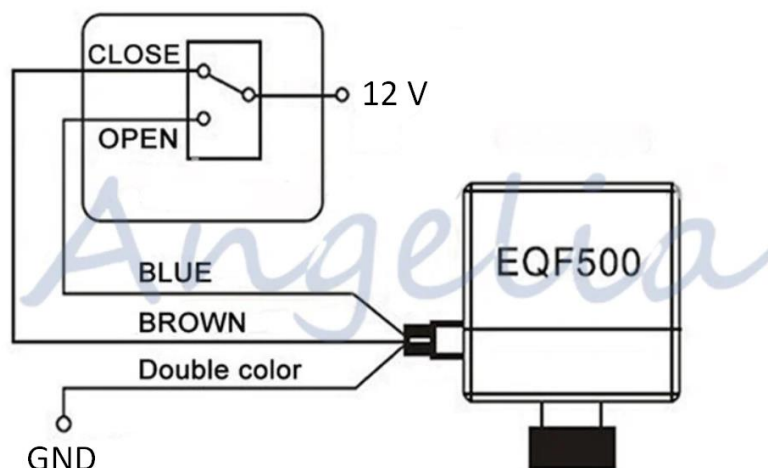
Pro tuto specifickou aplikaci bylo nutné vybrat čerpadlo pracující s 12 V napětím. Protože každá větev kapkové závlahy obsahuje několik koncových bodů, bylo by vhodné, aby čerpadlo mělo co největší průtok a dokázalo dostatečně zásobovat tyto koncové body vodou.

Po zvážení všech parametrů bylo vybráno 12 V ponorné čerpadlo Comet Ocean-Plus. Toto čerpadlo dosahuje maximálního průtoku 25 l/min, maximální výtlačné výšky 20 m a maximálního tlaku 2 bary. Výkon čerpadla je maximálně 95 W. Čerpadlo je určeno pro čerpání čisté, ale i dešťové vody. Protože zatím není jasné, jak moc znečištěná voda bude tímto čerpadlem čerpána, bude vhodné čerpadlo opatřit filtrem hrubých, ale i jemnějších nečistot. Maximální doba chodu naprázdno je 30 minut. Programové vybavení řídicího systému bude zajišťovat kontrolu, zda čerpadlo neběží na prázdko. [16]

4.8 Ventily

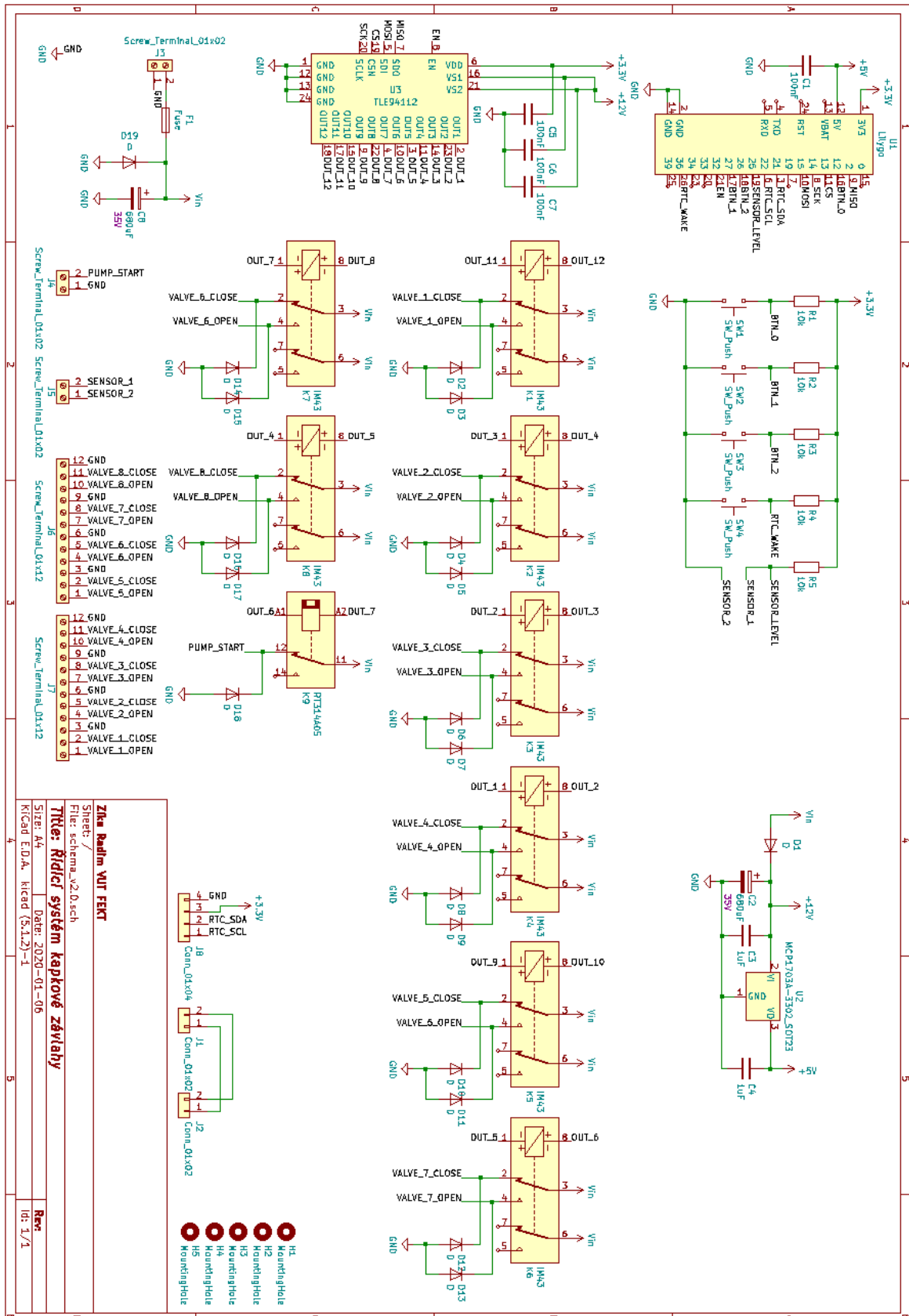
Pro řízení jednotlivých větví kapkové závlahy byly vybrány kulové ventily Angelia EQF 500 ovládané 12 V napětím. Tělo ventilů je vyrobeno z mosazi. Plné otevření/zavření ventilu trvá 5 vteřin a úhel rotace ventilu je 90°. Pro otevírání/zavírání ventilu je potřeba 0,5 A. Ventil je navržen pro maximální tlak 1,6 Mpa s tím, že maximální rozdíl tlaků na ventilu nesmí přesáhnout 0,4 Mpa. [17]

Pro řízení ventilu jsou využity 3 vodiče. Modrý pro otevření, hnědý pro zavření a dvojbarevný jako zem. Pokud chceme ventil otevřít, přivedeme tedy na modrý vodič 12 V napětí a dvojbarevný vodič připojíme na zem. Pokud chceme ventil zavřít, přivedeme 12 V napětí na hnědý vodič a dvojbarevný vodič připojíme na zem. Schéma řízení ventilu je uvedeno na obrázku 14.



Obrázek 14: Schéma řízení ventilu EQF 500 [17]

4.9 Schéma navrženého řídicího systému



Obrázek 15: Schéma navrženého řídicího systému

4.10 Teoretický návrh řídicího programu

Řídicí program mikroprocesoru ESP32 bude schopen komunikovat s driverem pro ovládání relé TLE94112EL. Za pomoci externího RTC a dat uložených v paměti EEPROM mikroprocesoru bude vyhodnocovat spouštění jednotlivých rozvrhů závlahy. Na pokyn mikroprocesoru bude tedy driver měnit stavy relé dle nastavení konkrétního rozvrhu závlahy. Závlahové rozvrhy budou uloženy v paměti EEPROM pro ochranu dat v případě výpadku napájecího napětí. Řídicí program bude obsluhovat také uživatelské rozhraní, které tvoří e-ink displej a čtyři tlačítka. Uživatel bude schopen pomocí tlačítek pracovat s rozvrhy závlahy, zobrazit si aktuální čas a nastavit datum a čas. Závlahové rozvrhy bude možno vytvářet, zobrazovat a mazat.

Projekt se má zaměřit také na energetickou úspornost řídicího systému. Pro programovou část to znamená efektivní přepínání mezi aktivním režimem a režimem spánku. Pro ještě větší úsporu energie bude řídicí program rozdělen na dvě části podle toho, zda došlo k probuzení mikroprocesoru uživatelem pomocí tlačítka, nebo mikroprocesorem samotným pomocí RTC. Pokud dojde k probuzení mikroprocesoru pomocí RTC, program vyhodnotí pouze podmínky pro spuštění závlahy a zase se uspí. Nedojde tedy ke zbytečnému vykreslení menu pro uživatele. K probouzení mikroprocesoru za pomoci RTC bude docházet periodicky každou čtvrt hodinu reálného času. Tímto bude zajištěno přesné spouštění nebo zastavování zavlažování s minimální délkou závlahy 15 minut.

5 PRAKTICKÁ REALIZACE ZAŘÍZENÍ

V této kapitole je popsán návrh desky plošného spoje za pomoci softwaru KiCad a ukázka praktické realizace celého řídicího systému a ochranné krabičky.

5.1 Návrh desky plošného spoje

Pro návrh desky plošného spoje byl využit program KiCad. Program KiCad je open-source software a existuje pro něj mnoho knihoven a návodů, také v češtině.

5.1.1 KiCad

KiCad je open-source softwarový nástroj pro tvorbu elektronických schémat a kreseb desek plošných spojů. KiCad je souborem několika samostatných softwarových nástrojů, jako jsou KiCad – projektový manažer, Eeschema – tvorba schématu a editor komponent, Pcbnew – tvorba desky plošného spoje a editor jednotlivých vrstev a další užitečné nástroje pro tvorbu desek plošných spojů. KiCad žádným způsobem neomezuje velikost desky, jako je tomu u jiných konkurenčních programů, a dokáže snadno zpracovat až 32 měděných vrstev, až 14 technických vrstev a až 4 pomocné vrstvy. KiCad umí vytvořit všechny soubory potřebné pro vytváření desek plošných spojů, soubory Gerber, soubory pro vrtání, soubory umístění komponent a mnoho dalšího.

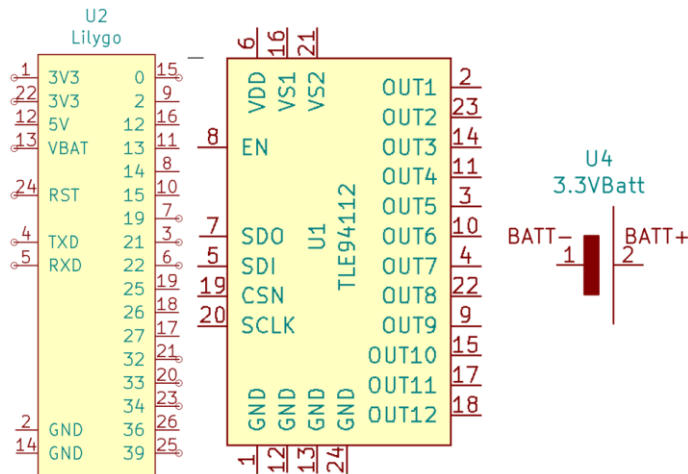
KiCad je multiplatformní software, a tak jeho distribuci nalezneme na Windows, Apple macOS a Linux.

KiCad se od ostatních softwarů pro tvorbu desek plošných spojů odlišuje tím, že odděluje schématické značky a pouzdra jednotlivých součástek. Při tvorbě schématu tak není nutné přemýšlet nad daným pouzdrém součástky, pouzdra jsou součástkám přiřazována až po vytvoření schématu. Při tvorbě desky plošného spoje pak zase není problém jednoduše změnit pouzdro součástky, aniž bychom zasahovali do schématu. [18]

Postup práce v programu KiCad se skládá ze dvou hlavních bodů. Kreslení schématu a rozvržení desky plošného spoje. KiCad obsahuje mnoho knihoven schématických značek součástek, ale i pouzder. Protože je software open-source, komunita okolo programu KiCad vytváří také komunitní knihovny nových nebo atypických součástek. Pokud ovšem potřebnou schématickou značku nebo pouzdro v knihovnách nenalezneme, KiCad obsahuje editor schématických značek a editor pouzder, kde si danou značku nebo pouzdro můžeme pohodlně vytvořit.

5.1.2 Schéma

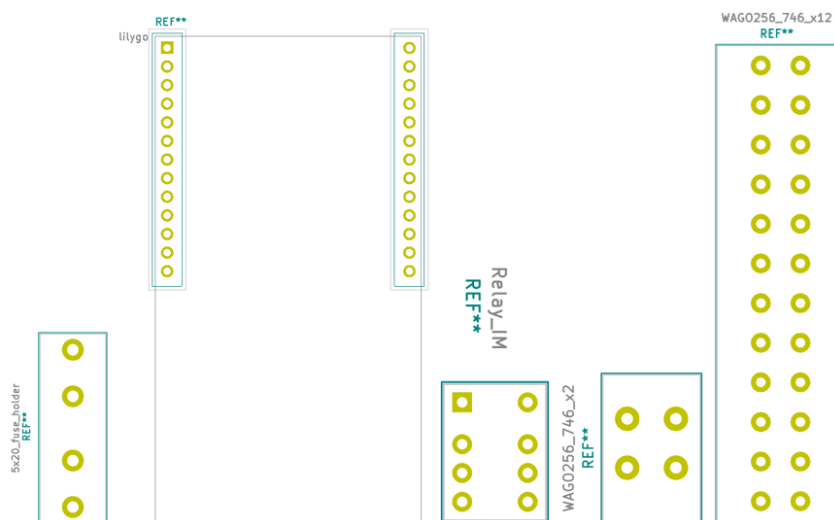
Při kreslení schématu bylo nutné vytvořit několik nových schématických značek, které se nenacházely v základním balíku knihoven KiCadu. Konkrétně se jedná o driver pro relé TLE94112EL, mikrokontrolér LilyGO TTGO e-ink T5 a záložní baterii pro napájení mikrokontroléru při výpadku napájecího napětí.



Obrázek 16: Vytvořené schématické značky součástek

5.1.3 DPS

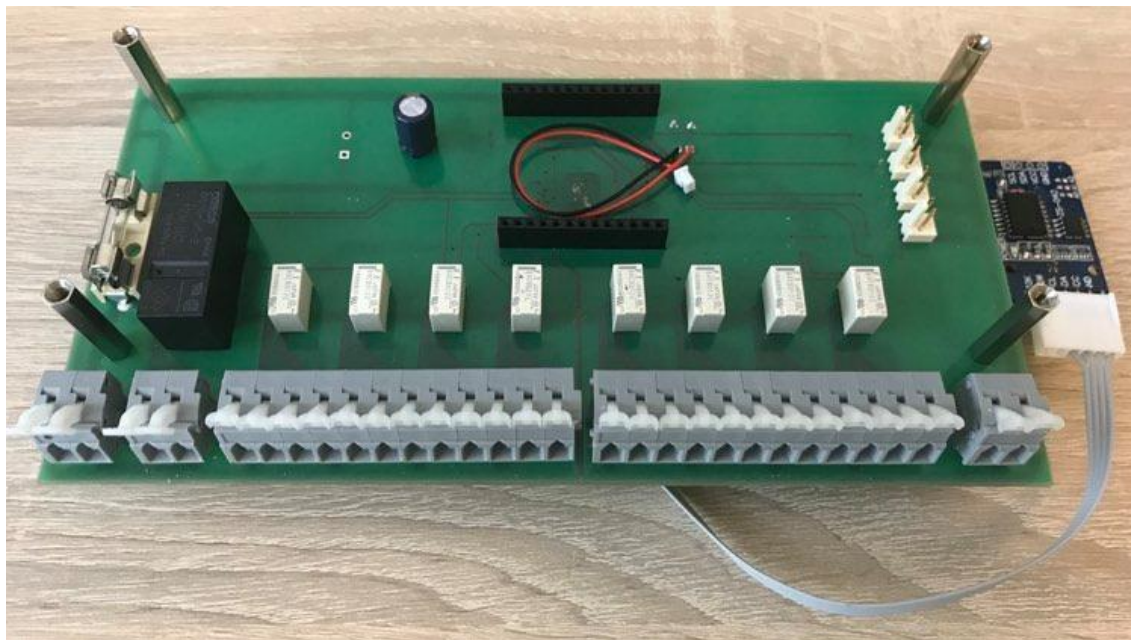
Jak už bylo zmíněno výše, pro některé součástky, které se nenacházely v základních knihovnách KiCadu, bylo nutné vytvořit schématické značky, ale také pouzdra. Vytvoření nových pouzder se týkalo mikrokontroléru LilyGO TTGO e-ink T5 a záložní baterie. Protože některá knihovní pouzdra nevyhovovala specifickým požadavkům, došlo také k vytvoření nových pouzder u bistabilních relé pro obsluhu ventilů, vytvoření nového pouzdra pro pojistku a vytvoření pouzder pro WAGO svorkovnice do DPS.



Obrázek 17: Vytvořená pouzdra součástek

5.2 Řídicí systém

Vyrobená DPS je osazena jednotlivými součástkami a komponenty. Do připravených děr pro uchycení DPS jsou vloženy distanční sloupky sloužící k uchycení řídicího systému do ochranné krabičky.



Obrázek 18: Osazená DPS řídicího systému

5.3 Ochranná krabička

Ochranná krabička je vytvořena pomocí 3D tiskárny podle návrhu, který byl vytvořen pomocí softwaru SOLIDWORKS.

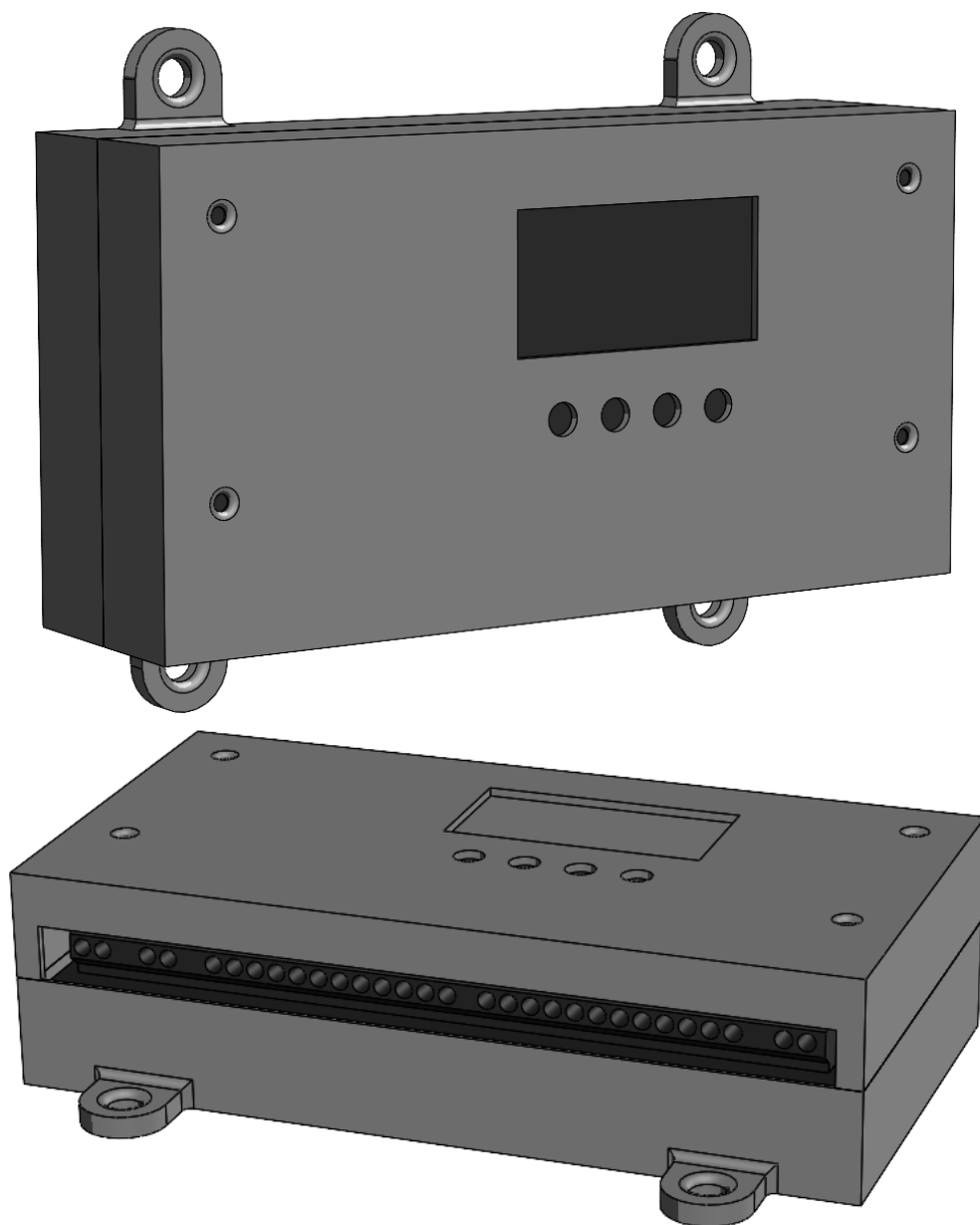
5.3.1 SOLIDWORKS

SOLIDWORKS je strojírenský 3D CAD software pro platformu Microsoft Windows, který byl vyvinut společností SOLIDWORKS Corporation. Předností SOLIDWORKS je v první řadě snadné a vizuálně přehledné ovládání a také kompletní lokalizace programu přímo výrobcem. Uživatelské rozhraní SOLIDWORKS je intuitivní, snižuje nutné pohyby myši a umožňuje kontextově závislou interakci s uživatelem. [19]

5.3.2 Model ochranné krabičky

Krabička je navržena jako dvoudílná a rozebíratelná sestava. Požadavkem na krabičku byla zejména ochrana celého zařízení před možným mechanickým poškozením. Ve spodním dílu krabičky jsou předpřipravené dva distanční sloupky sloužící pro uchycení externího RTC modulu. Spodní díl krabičky obsahuje z vnější strany čtyři úchyty s děrami, tyto slouží pro přichycení zařízení na zeď.

Vrchní díl krabičky slouží pro ochranu přední strany DPS. Jsou v něm připravené kruhové díry pro umístění tlačítek a obdélníková díra pro e-ink displej. Na straně, kde jsou na DPS svorkovnice, je připravena zhruba 1 cm vysoká díra pro vedení kabelů ke svorkovnici.



Obrázek 19: 3D model krabičky

6 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

V této kapitole jsou popsány programy použité v rámci řešení této práce, použité knihovny a nejdůležitější části zdrojového kódu.

6.1 Vývojové prostředí Visual Studio Code

Visual Studio Code je open-source editor zdrojových kódů vyvinutý společností Microsoft pro Windows, Linux a Mac OS. Zahrnuje zabudovaný Git a mnoho dalších užitečných funkcionalit pro rychlé a jednoduché programování. Je vysoce modifikovatelný, umožňuje uživatelům měnit motivy, klávesové zkratky a předvolby a umožňuje rozšiřovat a modifikovat editor pomocí rozšíření dostupných prostřednictvím centrálního uložště. Tyto modifikace přidávají do editoru další funkce, které uživatel při své práci potřebuje. Jednou z modifikací je také vývojové prostředí PlatformIO, které je použito k tvorbě programového vybavení řídicího systému.[20]

6.2 Vývojové prostředí PlatformIO

PlatformIO je open-source vývojové prostředí kombinující IDE (tedy nástroj pro zápis zdrojového kódu), správce knihoven a nástroje pro překlad a nahrání výsledného projektu do mikrokontroléru. Toto vývojové prostředí lze provozovat jak pod operačním systémem Windows, tak Linux nebo Mac OS. V současnosti podporuje více než 30 platforem (Atmel AVR, Atmel SAM, Espressif, Freescale Kinetis, Silicon Labs EFM32 apod.), více než 800 vývojových desek a 20 frameworků (Arduino, CMSIS, WiringPi, libOpenCM3, Energia atp.). Nespornou výhodou tohoto prostředí je také více než 7 tisíc knihoven připravených k okamžitému použití. Pokud by však v seznamu nějaká knihovna chyběla, není žádný problém knihovnu přidat manuálně. [21]

PlatformIO tvoří základní kámen, který běží pod vlastním IDE. V tomto případě je to Visual Studio Code. PlatformIO ve výchozím stavu neobsahuje vše potřebné pro vývoj aplikací, ale pouze jakési jádro. Důležité nástroje se automaticky stáhnou při prvotním založení příslušného projektu. Podporovaným programovacím jazykem je C/C++. [22]

6.3 Použité knihovny

V projektu jsou použity základní knihovny nezbytné pro základní fungování mikroprocesoru ESP32, ale také specifické knihovny k jednotlivým částem řídicího systému:

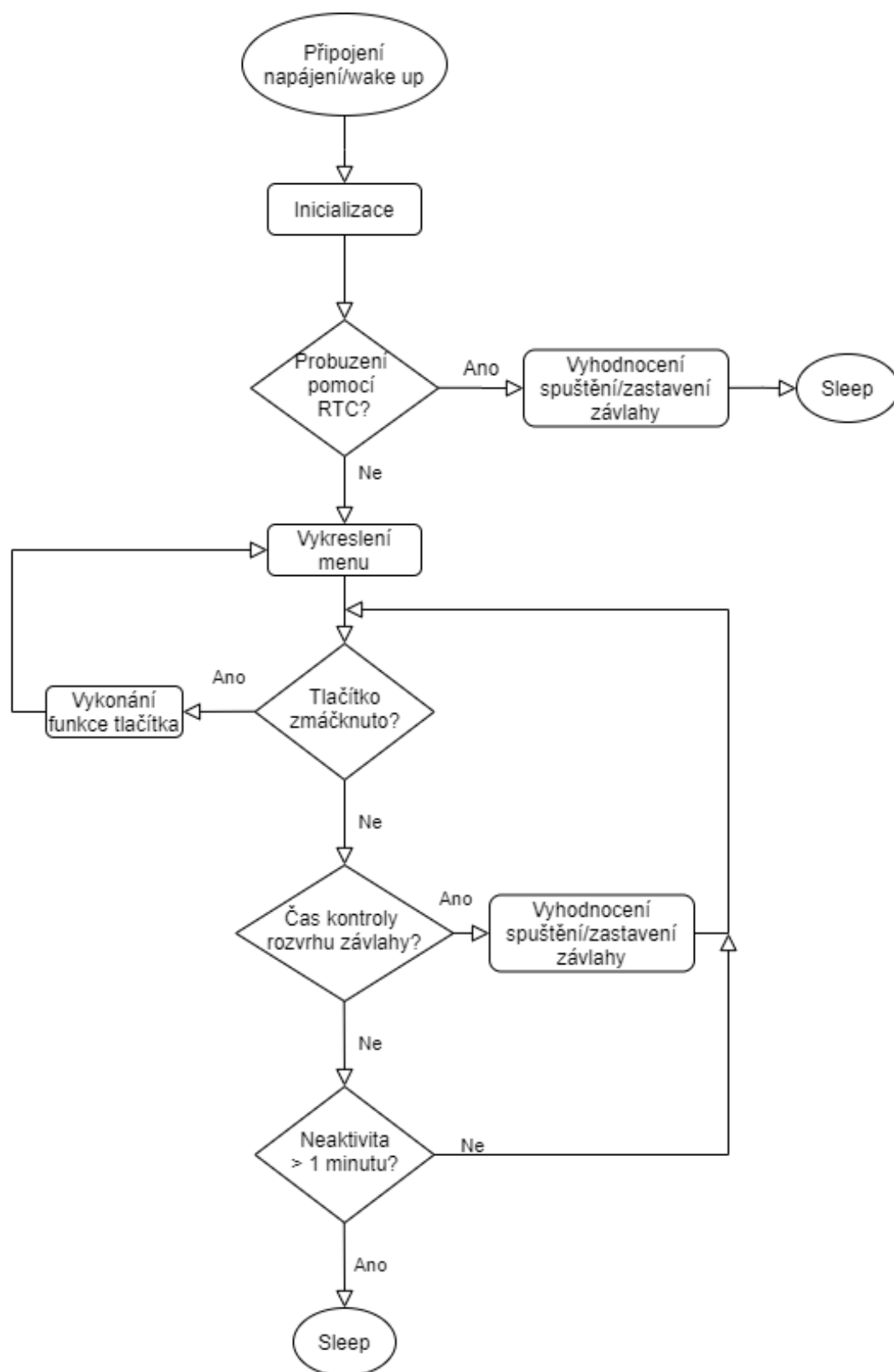
- Arduino.h – oficiální arduino framework. Tato knihovna přidává další knihovny pro základní fungování mikroprocesoru ESP32 a jeho periférií
- EEPROM.h – knihovna pro práci s integrovanou EEPROM pamětí na čipu ESP32
- GxGDE0213B72B.h [23] – knihovna obsluhující e-ink displej obsažený na mikrokontroléru LilyGO TTGO T5
- GxIO_SPI.h a GxIO.h – knihovny potřebné pro komunikaci mikroprocesoru s e-ink displejem a driverem TLE94112
- RTCLib.h [24] – knihovna pro práci a komunikaci s externím RTC čipem DS3231SN
- TLE94112.h [25] – knihovna obsluhující driver pro řízení relé TLE94112

Dále jsou v projektu vytvořeny a použity vlastní knihovny:

- menu.h – knihovna sloužící pro obsluhu a vykreslování uživatelského menu
- valve.hpp – knihovna obsahující třídy pro jednodušší zacházení s driverem pro řízení relé TLE94112

Většina ze základních knihoven je volně ke stažení z databáze knihoven vývojového prostředí PlatformIO.

6.4 Blokový diagram řídicího programu



Obrázek 20: Blokový diagram řídicího programu

6.5 Popis programu

Po připojení napájení nebo probuzení zařízení ze sleep modu provede program základní inicializaci všech jednotlivých částí řídicího systému. Po provedení veškeré potřebné inicializace program zjistí, jaká příčina vyvolala probuzení mikroprocesoru a podle této informace bude dále pracovat. Ke zjištění příčiny probuzení mikroprocesoru využívá program funkci *getWakeupReason()*. Zařízení je naprogramováno takovým způsobem, že k jeho probuzení z režimu spánku může dojít dvěma různými způsoby.

6.5.1 Probuzení mikroprocesoru interním RTC

Pokud dojde k probuzení tímto způsobem, znamená to, že se jedná o periodické probuzení každou čtvrt hodinu reálného času. Program provede inicializaci všech periférií a přechází rovnou na vyhodnocení podmínek pro spuštění nebo zastavení zalévání.

Jako první se provádí vyhodnocení pro zastavení zavlažování. O vyhodnocení zastavení závlahy se stará funkce *irrigationStopCheck()*. Funkce si nejprve načte aktuální čas z externího RTC a potom ho začne postupně porovnávat s časem zastavení závlahy jednotlivých rozvrhů uložených v paměti EEPROM. Pokud je zavlažování dle konkrétního rozvrhu aktivní a pokud je aktuální čas větší nebo roven času zastavení závlahy, funkce provede vypnutí čerpadla a zavření závlahových ventilů, které byly pro zalévání využívány.

Po vyhodnocení zastavení závlahy se provede vyhodnocení spuštění závlahy pomocí funkce *irrigationStartCheck()*. Tato funkce si opět načte aktuální čas z externího RTC. Ještě předtím, než funkce začne provádět porovnávání reálného času a času spuštění závlahy jednotlivých rozvrhů, provede kontrolu výšky hladiny. Pokud je senzor výšky hladiny rozepnutý, znamená to, že ve zdroji závlahové vody je vody nedostatek. Funkce proto uloží záznam chyby obsahující datum a čas vzniku chyby do paměti EEPROM a dále neprovádí kontrolu spuštění závlahy. V případě, že je senzor sepnutý a závlahové vody je dostatek, přejde funkce k samotnému porovnávání reálného času a času pro spuštění závlahy.

Po vyhodnocení obou podmínek již není zapotřebí žádná další aktivita mikroprocesoru. Pomocí funkce *goToSleep()* je vypočten čas zbývající do dalšího probuzení a mikroprocesor je na tuto dobu uveden do režimu spánku.

6.5.2 Probuzení mikroprocesoru tlačítkem nebo připojením napájení

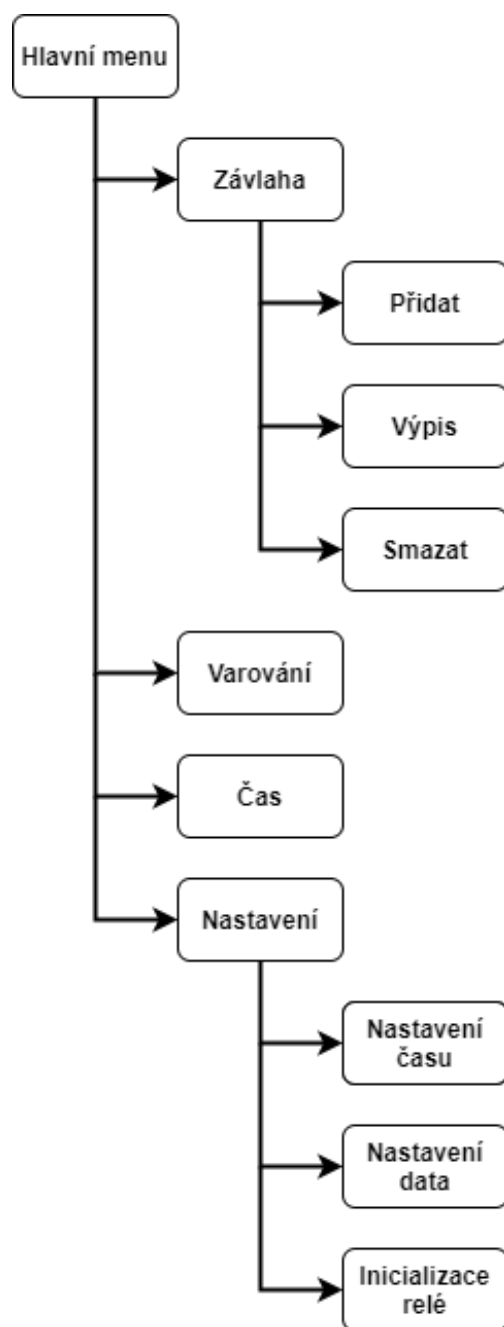
K probuzení mikroprocesoru tímto způsobem může dojít pomocí tlačítka OK připojeného na pin GPIO_36, nebo pomocí připojení napájení. Pro program to znamená, že došlo k neperiodickému probuzení. Po úvodní inicializaci periférií dojde k vykreslení uživatelského menu na obrazovku e-ink displeje a program přechází do nekonečné smyčky. Pro vykreslení menu se využívají dvě funkce. *menuDraw()* pro vykreslení jednotlivých položek menu a *menuDrawPrt()* pro vykreslení ukazatele na momentálně aktivní položku v menu. V této nekonečné smyčce program periodicky vyhodnocuje tři podmínky.

1. Pokud došlo ke stisku některého z tlačítek, provede jeho funkci, znovu vykreslí menu a vrátí se do hlavní smyčky. Ke zjištění stisku tlačítka je využita funkce *btnCheck()*, která vrací číslo zmáčknutého tlačítka.
2. Pokud nastal čas pro vyhodnocení podmínky spuštění nebo zastavení zalévání, vyhodnotí podmínku (popřípadě provede nastavení relátek) a vrátí se zpět do hlavního cyklu. Pro vyhodnocení této podmínky jsou využity funkce *irrigationStopCheck()* a *irrigationStartCheck()* popsané výše.
3. Pokud nebylo žádné z tlačítek zmáčknuuto déle než 1 minutu, provede se výpočet délky následujícího usnutí a zařízení se převede do režimu spánku. K tomuto úkonu je využita funkce *goToSleep()*.

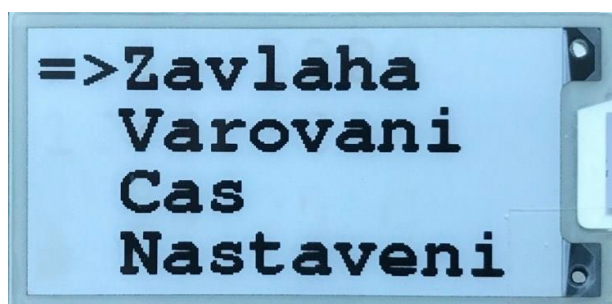
6.6 Uživatelské rozhraní

Jedním z požadavků na řídicí program bylo také vytvoření jednoduchého uživatelského rozhraní, ve kterém bude uživatel schopen pracovat s rozvrhy závlahy a provádět jednotlivá nastavení celého zařízení.

K ovládání uživatelského rozhraní jsou použita čtyři tlačítka. Tlačítko zpět, šipky nahoru a dolů a tlačítko OK. Funkce tlačítek zpět a OK se v průběhu ovládání menu nemění. Tlačítko OK slouží jako potvrzovací tlačítko, nebo jako tlačítko pro zanoření se do dalšího stupně menu. Tlačítko zpět slouží pro vymoření se z předešlého stupně menu, nebo pro zrušení právě nastavované funkcionality. Funkce tlačítek šipka nahoru a dolů se v průběhu ovládání menu mění. Základní funkcí šipek je pohyb v menu směrem nahoru a dolů. V některých částech menu (především nastavování nebo vytváření rozvrhu) slouží šipky pro inkrementaci nebo dekrementaci aktuálně aktivní hodnoty času. Pokud se zařízení nachází v režimu spánku, jsou všechna tlačítka kromě OK, které slouží k probuzení zařízení, neaktivní.



Obrázek 21: Struktura uživatelského menu



Obrázek 22: Menu vykreslené na displeji

Uživatelské menu je rozděleno do 4 hlavních stupňů pro pohodlné ovládání celého zařízení uživatelem.

Závlaha

V první části „Závlaha“ se nachází vše potřebné pro práci s jednotlivými rozvrhy závlahy. Uživatel může rozvrh vytvořit pomocí funkce „Přidat“, zobrazit si již vytvořené rozvrhy funkcí „Výpis“, nebo smazat vytvořené rozvrhy funkcí „Smazat“.

Varování

V této položce menu nalezne uživatel zprávu o případném nespuštění závlahy z důvodu nízkého stavu vody ve zdroji zavlažovací vody. Varování obsahuje datum a čas, kdy nebyla provedena závlaha. Po zobrazení varování uživatelem je varování smazáno a považováno za vyřešené.

Čas

Položka „Čas“ slouží pouze k zobrazení hodnot z externího modulu RTC. Uživatel dostane informaci o aktuálním datu, dni v týdnu a času.

Nastavení

Poslední položkou v menu je „Nastavení“. Tato položka slouží především pro nastavení hodnot externího modulu RTC, a tím provede synchronizaci reálného času a data s časem a datem uloženým v paměti modulu. Jednou z položek části nastavení je také „Inicializace relé“. Tato funkce slouží pro uvedení relé do základního stavu (čerpadlo vypnuto, ventily zavřeny) v případě změny stavu relé způsobeného například otřesem zařízení při převozu, nebo jinou vnější příčinou.

6.7 Závlahový rozvrh

Data závlahového rozvrhu jsou uložena v paměti EEPROM mikroprocesoru, aby nedošlo k jejich ztrátě v případě výpadku napájení. Řídicí program umožňuje uživateli vytvoření 10 závlahových rozvrhů. Každý rozvrh tvoří 21 bytů dat, která jsou rozdělena dle následující tabulky:

Tabulka 1: Rozložení dat závlahového rozvrhu v paměti

Byte	Hodnota
0	Validita dat rozvrhu
1	Aktivní zavlažování dle tohoto rozvrhu
2–3	Čas začátku zavlažování
4–5	Čas konce zavlažování
6–12	Závlahové dny tohoto rozvrhu
13–20	Závlahové ventily tohoto rozvrhu

Pro 10 rozvrhů je tedy v paměti vymezen prostor 210 bytů. Počet deseti rozvrhů byl stanoven jako dostatečný počet pro pohodlnou obsluhu zavlažování a zároveň přehlednost při nastavování rozvrhů.

Protože má paměť EEPROM omezený počet zápisů, je program napsaný tak, aby zbytečně do paměti nezapisoval, když to není nutné. V případě nastavování rozvrhu se veškerá data ukládají nejprve do pomocných dočasných proměnných a teprve až po uložení rozvrhu se data najednou zapíší do paměti EEPROM. Toto slouží jako ochrana paměti v případě, že se uživatel rozhodne v průběhu nastavování rozvrhu daný rozvrh neuložit.

7 ENERGETICKÁ BILANCE

Tato kapitola se zabývá energetickou bilancí celého zařízení. Kapitola je rozdělena na teoretickou energetickou bilanci, návrh měření reálné spotřeby zařízení a reálnou spotřebu zařízení.

7.1 Teoretická energetická bilance

Vzhledem k tomu, že navržený systém má být energeticky úsporný a napájený z baterie, je vhodné uvést zde energetickou bilanci celého zařízení. Řídicí část systému se skládá z mikrokontroléru LilyGO TTGO e-inK T5, driveru pro řízení relé TLE94112EL, regulátoru napětí MCP1703A, externího RTC DS3231, osmi bistabilních relé pro řízení ventilů a jednoho bistabilního relé pro řízení čerpadla. Pracovní část se pak skládá z čerpadla a osmi ventilů.

Řídicí část systému bude pracovat v několika režimech, a to:

- Normální režim – tento režim bude nastávat periodicky v určitých časových intervalech (každou čtvrt hodinu), nebo při nastavování časových rozvrhů uživatelem. V tomto režimu bude aktivní regulátor napětí, mikrokontrolér LilyGO TTGO a externí RTC. Driver pro řízení relé bude v režimu spánku.
- Režim spánku – tento režim bude nastávat, pokud nebude vyžadován žádný jiný režim. Mikrokontrolér, driver pro řízení relé a externí RTC budou v režimu spánku. Jedinou aktivní součástí bude regulátor napětí.
- Řídicí režim – tento režim nastane, pouze pokud dojde k požadavku na spuštění nebo zastavení zavlažování. V tomto režimu dojde ke změně stavu relé. Mikrokontrolér, regulátor napětí, externí RTC, ale také driver pro řízení relé budou v aktivním režimu.

Pracovní část systému bude pracovat ve třech režimech:

- Režim spánku – čerpadlo je vypnuté, ventily jsou v klidové poloze
- Závlahový režim – čerpadlo je aktivní, ventily jsou v klidové poloze
- Režim spuštění nebo zastavení závlahy – čerpadlo je vypnuté, u ventilů dochází k otevření nebo zavření.

Tabulka 2: Teoretická energetická bilance zařízení

Spotřeba jednotlivých zařízení v různých režimech – hodnoty typických proudů uváděné výrobcem						
Zařízení	Řídicí část			Pracovní část		
	Režim spánku	Normální režim	Řídicí režim	Režim spánku	Závlahový režim	Režim spuštění/zastavení závlahy
LilyGO TTGO T5 [10]	400 μ A	30 ~ 80 mA	30 ~ 80 mA			
Driver TLE94112EL [12]	0,6 μ A	0,6 μ A	5,5 mA			
Regulátor MCP1703A [13]	2 μ A	2 μ A	2 μ A			
RTC DS3231 [14]	100 μ A	200 μ A	200 μ A			
Bistabilní relé - ventily (max)	0 A	0 A	8 x 6 mA			
Bistabilní relé - čerpadlo	0 A	0 A	50 mA			
Čerpadlo Comet Ocean-Plus				0 A	8 A	0 A
Ventily Angelia EQF 500				0 A	0 A	8 x 0,5 A
Celkem	502,6 μ A	30,203 ~ 80,203 mA	133,7 ~ 183,7 mA	0 A	8 A	4 A

Do teoretické spotřeby mikrokontroléru LilyGO TTGO T5 byla započítána spotřeba mikroprocesoru ESP32 a dalších zařízení na mikrokontroléru. Protože k mikrokontroléru LilyGO TTGO T5 neexistuje žádná dokumentace zabývající se spotřebou zařízení, může se tato vypočtená hodnota od reálné hodnoty značně lišit.

Teoretická energetická bilance zařízení je uvedena v tabulce 2. Z tabulky je patrné, že velice záleží na době, po kterou se bude zařízení v jednotlivých režimech nacházet.

Pro řídicí část systému platí, že se po většinu času bude nacházet v režimu spánku. Pokud se někdy dostane do normálního režimu, tak jen tehdy, pokud bude uživatel nastavovat rozvrhy závlahy, nebo každou čtvrt hodinu, kdy dojde k probuzení mikrokontroléru a vyhodnocení, zda nenastal čas pro spuštění závlahy. Co se týče řídicího režimu, v tom se bude zařízení nacházet vždy pouze při změnách stavů relé. Pro tyto změny je potřeba jen několik málo milisekund, proto je tento režim takřka zanedbatelný.

Pracovní část se také bude nacházet po většinu času v režimu spánku. Závlahový režim pracovní části je nejnáročnější, co se spotřeby energie týče.

V tomto režimu je aktivní čerpadlo a probíhá zavlažování. Režim spuštění nebo zastavení závlahy bude vždy aktivní méně než 5 vteřin, které jsou potřeba pro otevření nebo zavření ventilu.

Z tohoto popisu vyplývá, že spotřeba celého zařízení velice závisí na nastavení rozvrhu závlahy. Pokud bude závlaha dlouhá a častá, bude celková spotřeba energie vysoká, především kvůli vodnímu čerpadlu a nutnosti otevírání a zavírání ventilů.

7.2 Návrh měření reálné spotřeby zařízení

Reálná spotřeba bateriově napájených zařízení se určuje podstatně hůře než jejich teoretická spotřeba. Ke stanovení reálné spotřeby jsou nutné nejen speciální metody měření (kvůli velice malým odběrům proudu bateriově napájených zařízení a následné chyby měřicích přístrojů), ale také odhad času, po který se bude systém nacházet v aktivním, nebo pasivním režimu. Stanovení reálné spotřeby zařízení doprovázejí také vnější vlivy, ať už je to změna teploty nebo pokles napětí baterie při odběru většího proudu. Kompromisem mezi snadností výpočtu a stupněm vlivu vnějších činitelů je výpočet spotřeby energie ze zákona o zachování náboje. Na straně zdroje budeme tedy uvažovat jeho náboj, definován jako kapacita (Ah) a na straně systému spotřebovaný náboj. [1]

Základní rovnicí, ze které budeme vycházet, je tedy rovnost nábojů zdroje a zařízení.

$$Q_{BAT} = Q_{SYS} \quad (9.1)$$

kde Q_{BAT} je náboj baterie a Q_{SYS} je náboj odebíraný systémem ze zdroje. Náboj odebíraný systémem ze zdroje se dá rozdělit do tří složek.

$$Q_{SYS} = \sum Q_P + \sum Q_A + Q_K [C] \quad (9.2)$$

kde Q_{SYS} je celkový náboj spotřebovaný systémem, Q_P je náboj spotřebovaný periodickou sekvencí vykonávanou se stejnou a známou délkou periody, Q_A je náboj spotřebovaný asynchronní sekvencí, která nastává nahodile, ale se známým počtem výskytu, a Q_K je kontinuální spotřeba náboje zařízení v pasivním režimu.

7.2.1 Periodická sekvence Q_P

Do této kategorie lze zařadit periodicky se opakující procesy, u nichž známe periodu opakování. V tomto případě je to probouzení zařízení každou čtvrt hodinu.

Protože periodická sekvence nemá po celou dobu stejnou spotřebu náboje, je nutné ji definovat jako sumu spotřeb náboje jednotlivých částí sekvence.

$$Q_P = \frac{t_L}{T_P} \sum I_n \Delta t_n [C] \quad (9.3)$$

kde Q_P je celkový náboj spotřebovaný za dobu sekvence, I_n je proud spotřebovaný jednou částí sekvence za dobu t_n . Doba životnosti baterie je označena jako t_L a perioda sekvence jako T_P . [1]

7.2.2 Asynchronní sekvence Q_A

Do této kategorie spadají nahodilé sekvence, v našem případě probuzení systému uživatelem. Periodicitu ani délku trvání těchto sekvencí nelze stanovit, proto se stanoví počet jejich výskytu.

$$Q_A = N_A \sum I_n \Delta t_n [C] \quad (9.4)$$

Kde Q_A značí celkový spotřebovaný náboj asynchronní sekvence, N_A počet výskytů asynchronní sekvence a I_n je proud spotřebovaný jednou částí sekvence za dobu t_n . [1]

7.2.3 Kontinuální spotřeba zařízení Q_K

Do této spotřeby je zahrnuta veškerá spotřeba zařízení a jeho modulů v době nečinnosti (režimu spánku). Zatímco spotřeba periodické a asynchronní sekvence je ovlivněna optimalizací programového vybavení, kontinuální spotřeba zařízení závisí zejména na obvodovém řešení celého systému. Kontinuální spotřeba zařízení je tedy stanovena jako součin celkové spotřeby zařízení v klidovém režimu po dobu životnosti baterie.

$$Q_K = I_C t_L [C] \quad (9.5)$$

kde Q_K je spotřebovaný náboj v kontinuálním režimu a I_C je proud spotřebovaný zařízením za dobu životnosti baterie t_L . [1]

7.2.4 Stanovení délky výdrže baterie

Pro stanovení délky životnosti baterie jsou definovány tři složky podstatně ovlivňující její životnost. Pokud vyjdeme ze základní úvahy a rovnice (9.1), dosadíme jednotlivé rovnice složek a provedeme vyjádření délky životnosti baterie t_L , dostaneme vztah pro délku životnosti baterie:

$$t_L = \frac{Q_{BAT} - \sum N_A Q_A}{\sum \frac{Q_P}{T_P} + I_C} [s] \quad (9.6)$$

kde Q_{BAT} je náboj baterie, N_A počet výskytů asynchronní sekvence, Q_A značí celkový spotřebovaný náboj asynchronní sekvence, Q_P je celkový náboj spotřebovaný periodickou sekvencí s periodou T_P a I_C značí proud spotřebovaný zařízením v klidovém režimu. [1]

7.2.5 Metody měření malých odběrů

Odběr navrženého zařízení se pohybuje od stovek μA do stovek mA. Měření takto malých proudů s dostatečnou přesností je problém. Při použití obyčejného multimetru se chyba přístroje pohybuje v řádu desítek mikroampér, což je pro tyto účely nepřijatelné. V této kapitole jsou proto uvedeny dvě možné metody měření spotřeby zařízení.

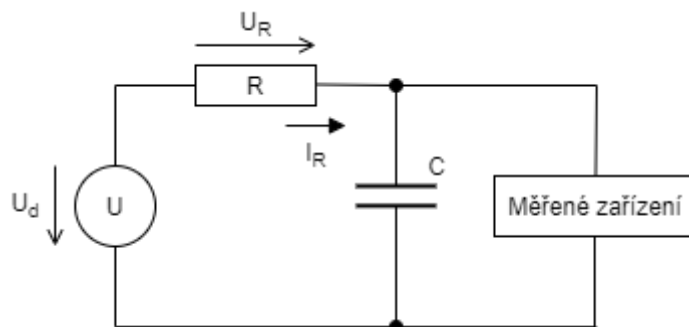
Měření náboje

Metoda měření spotřebovaného náboje zařízením je metoda nepřímá. Ze znalosti spotřebovaného náboje za určitý čas lze dopočítat podle vztahu

$$I = \frac{dQ}{dt} [A] \quad (9.7)$$

kde Q je náboj a t čas, celkový odebíraný proud zařízení.

K tomuto měření se využívá jednoduchého zapojení rezistoru a kondenzátoru, které je uvedeno na obrázku 23. Napájecí zdroj nabíjí přes rezistor R kondenzátor C s velkou kapacitou. Měřené zařízení je napájeno z kondenzátoru C . Náboj spotřebovaný zařízením za dobu měření odpovídá náboji, který musel být zdrojem dodán do kondenzátoru. Pokud tedy měříme úbytek napětí na rezistoru R , jsme schopni podle následujících vztahů dopočítat náboj spotřebovaný zařízením za dobu měření.



Obrázek 23: Zapojení pro měření náboje

Pro odvození vzorce pro výpočet spotřebovaného náboje vyjdeme z Ohmova zákona a definice proudu pomocí náboje.

$$I_R = \frac{U_R}{R} = \frac{dQ}{dt} [A] \quad (9.8)$$

kde I_R je proud tekoucí rezistorem s hodnotou odporu R a úbytkem napětí na rezistoru U_R . Proud rezistorem je také roven náboji Q , který projde rezistorem za čas t . Z této rovnice vyjádříme náboj Q :

$$Q_{MĚŘ} = \int_0^t \frac{U_R}{R} dt [C] \quad (9.9)$$

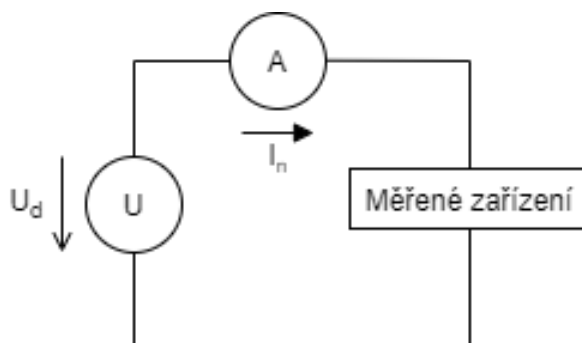
Pokud bude měření prováděno dostatečně dlouhou dobu a bude obsahovat všechny tři složky spotřeby zařízení (které jsou uvedeny výše), můžeme vztah (9.6) zjednodušit na vztah:

$$t_L = \frac{Q_{BAT} t_{MĚŘ}}{Q_{MĚŘ}} [s] \quad (9.10)$$

kde t_L je maximální doba výdrže baterie, Q_{BAT} je kapacita baterie, $Q_{MĚŘ}$ je celkový náboj spotřebovaný zařízením za měřený čas $t_{MĚŘ}$.

Měření proudu

Metoda měření spotřebovaného proudu zařízením je metoda přímá. K tomuto měření je však potřeba použít laboratorní měřicí přístroje s vysokou třídou přesnosti. Měřené zařízení je napájeno zdrojem a jeho okamžitý proudový odběr je měřen ampérmetrem zapojeným do série mezi zdroj a měřené zařízení. Schéma zapojení je uvedeno na obrázku 24.



Obrázek 24: Zapojení pro měření proudu

Náboj Q spotřebovaný zařízením za měřený interval je dán vztahem:

$$Q_{M\check{E}\check{R}} = \sum_{n=1}^N I_n t_{vz} [C] \quad (9.11)$$

kde I_n je hodnota vzorku naměřeného proudu za vzorkovací interval t_{vz} a N je celkový počet naměřených vzorků.

Pokud bude měření prováděno dostatečně dlouhou dobu a bude obsahovat všechny tři složky spotřeby zařízení (které jsou uvedeny výše), můžeme vztah (9.6) zjednodušit na vztah:

$$t_L = \frac{Q_{BAT} t_{vz} N}{Q_{M\check{E}\check{R}}} [s] \quad (9.12)$$

kde t_L je maximální doba výdrže baterie, Q_{BAT} je kapacita baterie, $Q_{M\check{E}\check{R}}$ je celkový náboj spotřebovaný zařízením za měřený čas t , který se rovná součinu vzorkovacího intervalu t_{vz} , a počtu naměřených vzorků.

7.3 Reálná spotřeba zařízení

Protože spotřeba zařízení vycházející z teoretické energetické bilance nemusí být přesná a nezahrnuje časové intervaly jednotlivých režimů, ve kterých se bude zařízení nacházet, je nutné provést měření reálné spotřeby zařízení. Vzhledem k faktu, že v době tvorby této práce byl ztížený přístup do laboratoře a k přesným laboratorním přístrojům, bylo měření spotřeby zařízení provedeno pouze v domácích podmínkách multimetrem UNI-T UT70A [26]. Měření bylo provedeno zjednodušenou formou, kdy byly naměřeny proudové odběry jednotlivých režimů a doby jejich trvání a poté byla dopočítána celková spotřeba zařízení. Protože řídicí režim (změna stavu relé) trvá v programu velice krátkou dobu, nebylo možné multimetrem spotřebu tohoto režimu změřit. Do výpočtu spotřeby energie vstupují tedy pouze spotřeba v režimu spánku, spotřeba v normálním režimu a spotřeby výkonových členů řídicího systému.

Tabulka 3: Naměřené hodnoty spotřeby energie jednotlivých režimů

Režimy	Spotřeba I [mA]
Režim spánku	4,86
Normální režim	65,4

Na první pohled jde vidět, že teoretická hodnota spotřeby energie v režimu spánku je asi osminová než hodnota naměřená. Důvodem této velké odchylky je fakt, že do teoretické spotřeby mikrokontroléru a modulu reálného času nejsou započítány spotřeby indikačních diod, které na RTC a mikrokontroléru svítí také v režimu spánku. Pro stanovení přibližné doby životnosti baterie jsou naměřená data dostačující. Pokud by bylo měření provedeno v laboratoři, bylo by vhodné uvést také nejistoty měření.

Pro zjednodušení výpočtu bude uvažována asynchronní spotřeba Q_A způsobena zásahem uživatele jako synchronní spotřeba Q_{P1} , s periodou jeden den a časovou délkou spotřeby 15 minut. Do výpočtu délky životnosti baterie vstupují tedy tři spotřeby. Dvě periodické spotřeby Q_P a spotřeba zařízení v režimu spánku. Druhá periodická spotřeba Q_{P2} je spotřeba zahrnující periodické vyhodnocování podmínky pro spuštění nebo zastavení zavlažování s periodou 15 minut a časovou délkou spotřeby $\sim 2,4$ s. Tato časová délka byla změřena jako délka od startu programu po usnutí zařízení obsahující inicializaci a vyhodnocení podmínek. Jako zdroj energie pro napájení zařízení je do výpočtu uvažována 12 V autobaterie s kapacitou 60Ah.

Dle rovnice 9.1 vypočteme délku životnosti baterie:

$$t_L = \frac{Q_{BAT} - \sum N_A Q_A}{\sum \frac{Q_P}{T_P} + I_C} = \frac{60000}{\frac{65,4 \cdot 0,25}{24} + \frac{65,4 \cdot \frac{2,4}{3600}}{0,25} + 4,86} = 10497h = 437 \text{ dní}$$

Tato hodnota je reálná pouze za předpokladu, že uživatel bude jednou denně 15 minut aktivně využívat zařízení a za celou dobu nebude ani jednou spuštěna závlaha. Pokud do výpočtu zahrneme také závlahu jakožto další periodickou spotřebu Q_{P3} , 1x denně po dobu 15 minut s využitím poloviny ventilů, délka životnosti baterie bez nabíjení bude drasticky menší:

$$t_L = \frac{Q_{BAT} - \sum N_A Q_A}{\sum \frac{Q_P}{T_P} + I_C} = \frac{60000}{\frac{65,4 \cdot 0,25}{24} + \frac{65,4 \cdot \frac{2,4}{3600}}{0,25} + \frac{8000 \cdot 0,25}{24} + \frac{2 \cdot 2000 \cdot \frac{4}{3600}}{24} + 4,86} = 672h = 28 \text{ dní}$$

Na tomto příkladu je jasně vidět, že spotřeba zařízení drasticky závisí na nastavení závlahových režimů. V případě častého zalévání se spotřeba energie enormně zvýší a výdrž baterie sníží.

8 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Při porovnání teoretických hodnot spotřeby zařízení uvedených v tabulce 2: Teoretická energetická bilance zařízení a hodnot naměřených a uvedených v tabulce 3: Naměřené hodnoty spotřeby energie jednotlivých režimů je patrné, že naměřená hodnota spotřeby v režimu spánku je asi 8krát větší než hodnota teoretická. Z největší části je tato odchylka způsobena svítivými diodami, které se nacházejí na modulu RTC a mikrokontroléru. Tyto diody svítí také v režimu spánku. Jejich odstraněním by bylo dosaženo snížení spotřeby celého zařízení. Avšak spotřeba samotného řídicího systému není pro životnost baterie směrodatným ukazatelem. V tabulce 1: Energetická bilance navrženého zařízení je také uvedena spotřeba výkonových částí zařízení, a to čerpadla a ventilů. Největší energetickou zátěží systému je vodní čerpadlo. Při své činnosti spotřebovává 8 A, což je více než stonásobek toho, co spotřebovává zařízení samotné v režimu spánku. V porovnání spotřeby energie výkonových členů a samotné řídicí jednotky lze tedy říct, že řídicí jednotka byla navržena úsporně. Bohužel spotřebu vodního čerpadla nelze nijak ovlivnit. Nejlepším řešením by bylo nenapájet čerpadlo 12 V přímo z řídicího systému, ale řídicím systémem pouze spínat externí napájecí zdroj pro čerpadlo. Tímto řešením by však vyvstal problém nutnosti dvojího napájení celého zařízení a zanikla by výhoda tohoto řešení spočívající v nutnosti pouze jednoho napájecího zdroje pro celý systém kapkové závlahy.

Při porovnání navrženého řídicího systému a řídicích systémů popsanych v kapitole 3.2 Průzkum trhu lze říct, že byl vytvořen použitelný řídicí systém kapkové závlahy kombinující výhody všech tří popsanych zařízení. Navržený systém umožňuje komplexní práci se závlahovými rozvrhy a ke své činnosti nepotřebuje síťové napájení. Poskytuje uživateli plnou kontrolu nad nastavením závlahových rozvrhů. Každý z 10 závlahových rozvrhů je plně nastavitelný a umožňuje uživateli vytvořit závlahový rozvrh přesně podle jeho požadavků. Celý systém je velice uživatelsky přívětivý, protože uživatelské menu a veškeré důležité informace se vykreslují na e-ink displeji. Proto zde odpadá starost s nastavováním rozvrhů přes různé kódové kombinace svítivých diod a podobně. Ideálním zdrojem napájení tohoto zařízení je systém 12V baterie a solárního článku. Řídicí systém je svou úsporností schopen přečkat dny, kdy solární článek z důvodu špatných podmínek nebude dobíjet baterii. Kombinací navrženého řídicího systému a systému baterie s dobíjením solárním článkem je možné vytvořit závlahový systém nepřetržitě pracující celou závlahovou sezónu bez nutnosti výměny baterií.

Pro navržený řídicí systém se nabízí také několik úprav, které by jeho vlastnosti zlepšily. Přívětivost uživatelského rozhraní mírně kazí délka obnovení vykreslených dat na e-ink displeji. E-ink displej byl zvolen zvláště z důvodu úspory

energie. Tato úspora se však nejeví jako podstatná pro delší životnost baterie. Pokud uživatel rozvrhy nastaví a již se dalším nastavováním v průběhu závlahové sezóny zabývat nebude, rozdíl energetické náročnosti e-ink displeje a například LCD displeje je v tomto případě zanedbatelný. Proto by možná bylo vhodné nahradit e-ink displej jiným zobrazovacím displejem pro větší komfort při ovládání zařízení. Do komfortu nastavování závlahových rozvrhů vstupuje také fakt, že uživatel musí být přítomen v těsné blízkosti zařízení a ovládat ho pomocí tlačítek. Mikrokontrolér LilyGO TTGO T5 je vybaven také Wi-Fi a Bluetooth. Tyto dvě technologie by se daly využít pro snadnější komunikaci mikrokontroléru s uživatelem. Uživatel by tak mohl nastavovat závlahové rozvrhy nebo kontrolovat stav zařízení také vzdáleně, nebo v blízkosti zařízení, avšak bez nutnosti fyzické interakce s řídicím systémem. Pro implementaci těchto dvou technologií by bylo nutné zjistit jejich energetickou náročnost v provozu a případně zajistit takový chod těchto technologií, aby výrazně neovlivnily celkovou spotřebu mikrokontroléru a přitom byly vždy dostupné pro navázání komunikace.

9 ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout koncepci elektronického systému pro řízení kapkové závlahy se zaměřením na energetickou úspornost zařízení.

První část práce je zaměřena na teoretický popis návrhu energeticky úsporných zařízení a popis kapkové závlahy. Druhá kapitola seznámí čtenáře se zásadami při návrhu energeticky úsporných zařízení. V kapitole jsou popsány základní myšlenky návrhu hardwarové a softwarové části zařízení. Třetí kapitola se zabývá teoretickým popisem kapkové závlahy. Charakterizuje také její výhody a nevýhody vůči ostatním typům zavlažování. Jsou zde popsány základní prvky vyskytující se v systému kapkové závlahy. Dále byl proveden průzkum trhu zaměřující se na běžně dostupné závlahové řídicí systémy. Z mnoha systémů různých výrobců byly vybrány 3 systémy z různých cenových skupin a také s různými funkcemi a vlastnostmi. Koncept navrhovaného systému je popsán ve čtvrté kapitole. Na začátku kapitoly jsou uvedena bloková schémata řídicího systému a systému kapkové závlahy vyjadřující principy fungování navrhovaného řídicího systému a řízeného systému kapkové závlahy. Dále jsou v této části popsány specifikace jednotlivých prvků řídicího systému a jejich funkce. Na konci kapitoly je teoreticky rozebrána funkce řídicího programu.

Ve druhé části práce je rozebrána praktická realizace celého zařízení. Na začátku šesté kapitoly je nastíněna problematika návrhu DPS pomocí softwaru KiCad. Dále je uvedena ukázka osazené DPS řídicího systému a model ochranné krabičky pro řídicí systém. Popis praktické realizace pokračuje také sedmou kapitolou, kde jsou popsány programy použité v rámci řešení této práce, použité knihovny a popis nejdůležitějších úvah a funkcí využívaných v řídicím programu. V další části této práce je také popsána energetická bilance zařízení. Kapitola obsahuje teoretickou energetickou bilanci celého zařízení, teoretický popis měření spotřeby bateriově napájených zařízení a také měření a výpočet reálné spotřeby zařízení. V podkapitole reálná spotřeba zařízení byla také vypočtena teoretická provozní doba zařízení. Poslední kapitola obsahuje zhodnocení dosažených výsledků a porovnání navrženého řídicího systému s jinými řídicími systémy kapkové závlahy.

Výsledkem této bakalářské práce je úsporný řídicí systém kapkové závlahy napájený 12 V umožňující připojení osmi elektromagnetických kulových ventilů a jednoho čerpadla pro čerpání závlahové vody do systému kapkové závlahy. Systém poskytuje přehledné uživatelské rozhraní pro pohodlné nastavování závlahových rozvrhů. Vytvořený řídicí systém je připraven k instalaci a uvedení do ostrého provozu.

Literatura

- [1] LEVEK, V. a ŠTEFFAN, P. *Zásady návrhu bateriově napájených zařízení* [online]. [cit. 2020-05-15] Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/zasady-navrhu-bateriove-napajenych-zarizeni/>
- [2] SAMEK, M. *Modern Embedded Systems Programming* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.state-machine.com/doc/Samek0710.pdf>
- [3] SATHYAPRIVA, Eswaran el al. *AN EMPIRICAL STUDY ON DRIP IRRIGATION*, 2017 [online]. [cit. 2019-12-23]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/321137448_DRIP_IRRIGATION_full_paper
- [4] AMINE, B. *What is drip irrigation?* [online]. [cit. 2019-12-23]. Dostupné z: <https://irrigation.expert/blog/what-is-drip-irrigation/>
- [5] LODYHA, Zdeněk. *Kapkové zavlažování*, 2007 [online]. [cit. 2019-12-25]. Dostupné z: <http://exterier.hyperbydleni.cz/zahradni-technika/55-kapkove-zavlazovani/>
- [6] HUNTER. Hunterindustries. *Irigation product: controllers* [online]. [cit. 2019-12-26]. Dostupné z: <https://www.hunterindustries.com/irrigation-product/controllers/pro-hc/>
- [7] TORO. *Agriculture: irrigation controllers*, 2020 [online]. [cit. 2019-12-26]. Dostupné z: <https://www.toro.com/en/agriculture/irrigation-controllers/ddcwp>
- [8] RAINBIRD BIRD CO. Rainbird. *Products: esp-rzx*, 2020 [online]. [cit. 2019-12-26]. Dostupné z: <https://www.rainbird.com/products/esp-rzx>
- [9] SHENZHEN XIN YUAN ELECTRONIC TECHNOLOGY CO. LilyGO. *LILYGO® TTGO T5 V2.3 2.13 Inch E-Paper Screen*, 2013 [online]. [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: http://www.lilyGO.cn/prod_view.aspx?TypeId=50031&Id=1149
- [10] ESPRESSIF SYSTEMS (SHANGHAI) CO. Espressif. *Products: ESP32 datasheet*, 2019 [online]. [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: <https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp32/overview>
- [11] ØYVIND, Nydal Dahl. *What is an H-Bridge?*, 2018 [online]. [cit. 2019-12-28]. Dostupné z: <https://www.build-electronic-circuits.com/h-bridge/>
- [12] INFINEON TECHNOLOGIES AG. Infineon. *Product: multi half bridge, TLE94112EL datasheet*, 2020 [online]. [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/motor-control-ics/intelligent-motor-control-ics/multi-half-bridge-ics/tle94112el/?redirId=106324>

- [13] MICROCHIP. *Product: MCP1703A*, 2020 [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/MCP1703A>
- [14] MAXIM INTEGRATED. *DS3231 datasheet* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/real-time-clocks/DS3231.html>
- [15] JONATHANRJPEREIRA. Instructables. *All You Need to Know About a Relays* [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/id/All-You-Need-to-Know-About-Relays/>
- [16] CONRAD. *Ponorné čerpadlo Comet Ocean-Plus, datasheet* [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/ponorne-cerpadlo-comet-ocean-plus-12-v-dc-8-a-25-l-min-20-m.k552371>
- [17] ANGELIA PLUMBING. *DC12V/24V DN25 G1" BSPP Brass 2 Way Motorized Ball Valve Electrical Actuator Valve* [online]. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/item/32880073365.html?spm=a2g0o.detail.1000013.5.4c2a227eMWwdhJ&gps-id=pcDetailBottomMoreThisSeller&scm=1007.13339.146401.0&scm_id=1007.13339.146401.0&scm-url=1007.13339.146401.0&pvid=f77489aa-8b9d-47ae-8b31-2e23df2bc5c1
- [18] JAHSHAN, David et al. *Introduction to KiCad*, 2015 [online]. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: https://docs.kicad-pcb.org/5.1.5/en/getting_started_in_kicad/getting_started_in_kicad.html
- [19] SOLIDWORKS [online]. [cit. 2020-05-20] Dostupné z: <https://www.solidworks.cz/>
- [20] Visual Studio Code [online]. [cit. 2020-05-20] Dostupné z: <https://code.visualstudio.com/>
- [21] PLATFORMIO. *What is PlatformIO?* [online]. [cit. 2020-05-20] Dostupné z: <https://docs.platformio.org/en/latest/what-is-platformio.html>
- [22] BŘICHÁČEK. *PlatformIO – otevřený ekosystém pro vývoj IoT* [online]. [cit. 2020-05-22] Dostupné z: <https://blog.brichacek.net/platformio-otevreny-ekosystem-pro-vyvoj-iot/>
- [23] ZINGGJM. *GxEPD* [online]. [cit. 2020-05-23] Dostupné z: <https://github.com/ZinggJM/GxEPD>
- [24] ADAFRUIT. *RTCLib* [online]. [cit. 2020-05-23] Dostupné z: <https://github.com/adafruit/RTCLib>
- [25] INFINEON. *DC-Motor-Control-TLE94112EL* [online]. [cit. 2020-05-23] Dostupné z: <https://github.com/Infineon/DC-Motor-Control-TLE94112EL>
- [26] UNI-TREND International. *Operating Manual of UT70A Multimeter* [online]. [cit. 2020-05-30] Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/ut70a/digitalni-multimetry-prenosne/uni-t/>

Seznam použitých zkratek

Wi-Fi	Wireless Fidelity
IP	Ingress Protection
E-ink	Technologie elektronického inkoustu
A/D	Analog/Digital
D/A	Digital/Analog
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter
I2C	Internal-Integrated-Circuit Bus
I2S	Internal-Integrated-Circuit Sound
PWM	Pulse Width Modulation
ROM	Read-only memory
SRAM	Static random-access memory
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
RTC	Real-time clock
RC	Resisto-capacitor
LED	Light-Emitting Diode
MAC	Media Access Control
DMA	Data Memory Access
SPDT	Single pole, double throw
DPDT	Double pole, single throw
DPS	Deska plošného spoje
Open-source	Počítačový software s otevřeným zdrojovým kódem
MCU	Microcontroller unit

Seznam příloh na CD

Název souboru/adresáře		Význam
./3D_models/	–	3D modely krabičky a sestava
./drip_irrigation/	–	PlatformIO projekt
./drip_irrigation/include/	–	Pomocné knihovny projektu
./drip_irrigation/lib/	–	Externí použité knihovny
./drip_irrigation/src/	–	Zdrojové soubory pomocných knihoven a hlavní program práce
./kicad/	–	KiCad projekt (schéma, dps, gerber)
./zika_system_pro_rizeni_kapko ve_zavlahy.pdf	–	Vlastní text bakalářské práce